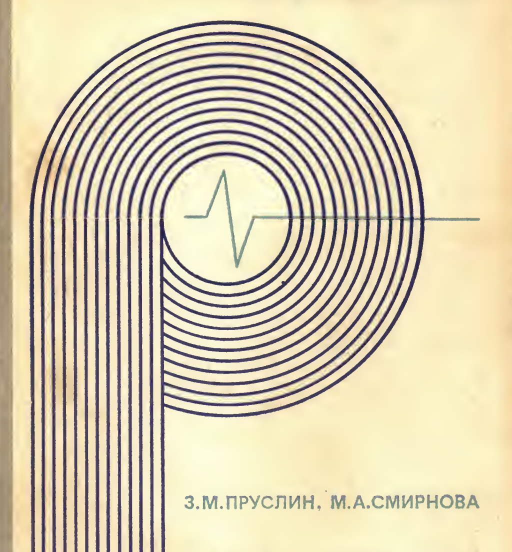
ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



З.М.ПРУСЛИН, М.А.СМИРНОВА

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

З. М. ПРУСЛИН, М. А. СМИРНОВА

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИЗДАНИЕ 4-е, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета Совета Министров СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебника для средних
профессионально-технических учебных заведений

МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1975

6Ф
П85

Со асеми замечаниями просим обращаться по адресу: *Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

Пруслин З. М., Смирнова М. А.

П85 Радиоэлектроника. Учебник для средних проф.-техн. учеб. заведений. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Высшая школа», 1975 г.

320 с. с ил.

В учебнике нзложены принципы радносвязн, рвдиовещвния, радиолокации, импульсной н вычислительной техники. Осноаное анимание уделено рассмотренню фнзическнх процессов в радиоаппаратуре.

В четвертом нздвнии кннгн рвсширен мвтернал, касающийся схем на полупроводниковых приборах, более подробно рассмотрены основные элементы вычнслительных устройств.

Главы I—VII, XIV нвписвны нвндидатом технических наук Пруслиным З. М., главы VIII, X—XIII — инженером Смирновой М. А., глава IX— инженером Кумыш Л. П.

$П\frac{30401-250}{052(01)-75}60-75$ 6Ф

Предисловие

Одной из главных задач, вытекающих из решений XXIV съезда КПСС, является ускорение темпов научно-технической революции, использование всех создаваемых ею возможностей для развития производительных сил.

Решение этих задач обусловливает необходимость дальнейшего повышения как общего, так и профессионального уровня знаний рабочих, осуществляемого в системе профессионально-технического образования, которая является подлинной кузницей рабочих кадров. В девятой пятилетке намечено подготовить около 9 млн. специалистов, в том числе в области радиоэлектроники.

Радиоэлектроника широко применяется во всех областях науки и техники, играет все более важную роль в обеспечении технического прогресса в нашей стране. Развивается и совершенствуется техника радиосвязи, радиовещания и телевидения. Все шире внедряется вычислительная техника, средства автоматики, телемеханики, телеметрии в народном хозяйстве. В производстве радиоаппаратуры все больше применяется прогрессивная технология с использованием новых технических средств. Это предъявляет высокие требования к профессиональной подготовке, уровню знаний и общей культуре рабочих, занятых в производстве радиоэлектронной аппаратуры.

Четвертое издание книги «Радиоэлектроника» отражает динамику развития как самой отрасли знаний, так и ее использования в различных областях народного хозяйства и отличается от предыдущего рядом дополнений, продиктованных современным состоянием техники.

Учебник рассчитан на учащихся средних профессионально-технических учебных заведений, готовящих монтажников и регулировщиков радиоаппаратуры, и соответствует программе, утвержденной Государственным комитетом Совета Министров СССР по профессионально-техническому образованию.

Учебник может быть также полезен радиолюбителям, интересующимся вопросами радиотехники и электроники.

Глава I
ВВЕДЕНИЕ

§ 1. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Краткий исторический обзор развития радиотехники

Советский народ с полным основанием гордится тем, что наша страна является родиной радио. Радио изобрел замечательный русский ученый А. С. Попов (1859—1906). Датой изобретения радио считается 7 мая 1895 года, когда А. С. Попов выступил на заседании физического отделения Русского физико-химического общества в Петербурге с докладом «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». В докладе он сообщил об изобретенном им приборе для приема и регистрации электромагнитных волн и продемонстрировал первый в мире радиоприемник. День 7 мая вошел в историю науки как день рождения радио.

Изобретению радио предшествовал ряд важных исследований, проведенных выдающимися физиками и электротехниками в области электричества и магнетизма. В 1820 году X. Эрстед установил взаимную связь между электрическими и магнитными явлениями. В 1831 году М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции — основу современной электротехники и радиотехники. В 1873 году Д. Максвелл опубликовал свою знаменитую работу о волновом характере распространения электромагнитных волн. В 1888 году Г. Герц, а в 1895 году П. Н. Лебедев экспериментально подтвердили правильность теоретических выводов Максвелла.

А. С. Попов многократно повторил опыты Г. Герца с электромагнитными волнами. Он установил, что можно увеличить дальность обнаружения присоединением к прибору провода, получившего название антенны; применил в своих приборах элементы настройки на определенную длину волны. В 1897 году А.С. Попов осуществил радиосвязь между двумя кораблями на расстоянии 5 км. Он обнаружил, что радиоволны отражаются от кораблей. Это явление было положено в основу радиолокации. В 1899 году П. Н. Рыбкин, ближайший помощник А. С. Попова, обнаружил возможность приема радиотелеграфных сигналов на слух. В этом же году А. С. Попову и П. Н. Рыбкину удалось осуществить радиосвязь на расстоянии свыше 40 км, а в 1901 году они устано-

вили на Черном море связь между кораблями на расстоянии 130 км. Несмотря на большие заслуги перед наукой А. С. Попов работал в тяжелых условиях. Царское правительство отнеслось к изобретению с недоверием; выдаваемые на его работы денежные средства были ничтожно малы.

После победы Великой Октябрьской социалистической революции в нашей стране уделяется большое внимание развитию радиосвязи и радиовещания. 21 июня 1918 года В. И. Ленин подписал декрет «О централизации радиотехнического дела». По указанию В. И. Ленина была организована Нижегородская радиолаборатория во главе с талантливым инженером М. А. Бонч-Бруевичем. Эта лаборатория сыграла большую роль в развитии отечественной радиотехники. В 1919 году в Нижегородской лаборатории были созданы первые советские электронные лампы, а в 1920 году построен первый радиовещательный передатчик.

В. И. Ленин придавал большое значение работе лаборатории. Так, в связи с успешными опытами по радиотелефонной передаче 5 февраля 1920 года он пишет письмо М. А. Бонч-Бруевичу, в котором благодарит его за большую работу в области радио и обещает свое всемерное содействие в деле создания «газеты без бумаги и без расстояния». По предложению В. И. Ленина Политбюро ЦК партии 25 мая 1922 года приняло решение о финансировании Нижегородской радиолаборатории для наибольшего ускорения разработки, усовершенствования и производства громкоговорящих телефонов и радиоприемников. Первая радиотелефонная станция мощностью 12 кВт начала радиовещание в Москве в 1922 году. Она была построена коллективом Нижегородской радиолаборатории.

В годы довоенных пятилеток радиопромышленность СССР уже развилась в крупную самостоятельную отрасль промышленности. Было создано много научных институтов и лабораторий, занимающихся вопросами радиотехники. Большое число учебных заведений подготовило и продолжает готовить многочисленные кадры радиоспециалистов.

В развитие отечественной радиотехники внесли большой вклад ее основоположники М. А. Бонч-Бруевич, М. В. Шулейкин, Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси, В. П. Вологдин, Б. А. Введенский и др. Достигнуты крупные успехи в области электроники, в производстве новых типов электровакуумных приборов, малогабаритных радиодеталей. Освоено производство полупроводниковых приборов, развернуты большие работы по внедрению нового вида связи — радиорелейных линий. За последние несколько лет построены десятки телевизионных центров и мощных трансляционных станций.

Ярким свидетельством успехов советской радиотехники является ее роль в обеспечении запуска искусственных спутников Земли и космических ракет: впервые в истории человечества радиосвязь вышла за пределы земного шара — в космическое пространство. Обеспечена двусторонняя радиосвязь космических кораблей с планетой Земля и двусторонняя связь в космосе между космическими кораблями.

В настоящее время трудно назвать такую отрасль иаукн, техники, иародного хозяйства н культуры, где бы ие прнменялась раднотехиика. Оиа имеет много самостоятельных отраслей: радносвязь, раднове-щание, телевндение, радиолокация, раднонавнгацня, радиоастрономня, радиотелеметрня и др.

. Радиосвязь имеет огромиое значение. Наша страна связана раднолиииямн с крупными городамн Европы, Азии, Афрнкн, Латннской Америки. Москва поддерживает постояииую радносвязь со столнцами союзных республик. По радио связаиы между собой крупные промышлеиные цеитры. Радио является едииствеииым средством связи отдалеииых пунктов Севера н других окраии нашей страны с Большой Землей. Радносвязь можио нспользовать н для управлеиия энергосистемами, иефтепроводамн, газопроводами.

Радиовещаиие является мощным средством политического и культуриого воспитаиия масс. В иашей стране построено много радиовещательных стаиций, техиическн совершенствуются действующие стаиции. Особеиио большое винмаине уделяется развнтию радновещаиия на ультракоротких волнах (УКВ). Создается сеть радностаицнй с частотной модуляцией. Это поможет решнть проблему многопрограммного вещаиня. Предполагается довестн число радновещательиых программ до шести-семи, из иих примерио четыре будут передаваться на УКВ. Завершается радиофикация страиы. Налажен массовый выпуск радиоприемииков иа полупроводинках.

Телевиденне получает большое развнтие. Если в 1953 году в нашей страие работало всего три телецеитра и было 225 тыс. телевнзиоиных приемииков, то к иачалу 1971 года работало 280 мощиых телевизиоиных станций н 1000 станций малой мощностн н у населеиня было около 35 млн. телевнзиоиных приемннков.

К 50-летию Великого Октября в Москве была введеиа в эксплуатацию радиотелевизиоииая передающая стаиция, размещеииая в свободио стоящей железобетоииой башие, высота которой вместе с аитеииой достнгает 533 м. Сейчас эта станция передает 4 телевизиоиные программы и 5 радиовещательных программ иа УКВ. В октябре 1967 года были начаты регуляриые передачн нз Москвы программ цветного телевндеиия.

Исключнтельио важиое значеиие для дальиейшего прогресса телевизноииого вещаиия нмело развитие космической связн. Создаиие снстемы телевнзиоиного вещания с нспользованнем искусствеииого спутиика связн «Молиия-1» дало возможность жителям многих отдалениых райоиов нашей страиы смотреть передачи телевндеиия нз Москвы. В блнжайшие годы значнтельио возрастет зиачеиие искусствениых спутинков связн, так как увелнчнтся количество иаземиых стаиций, способиых прииимать н ретранслировать прииимаемые ими телевизиоиные передачи, в том числе н передачи цветиого телевидеиия.

Радиолокацня имеет большое обороиное значение. Радиолокациоиные стаицни (радиолокаторы) дают возможность обиаружить местоположение самолетов н других объектов, определить их координа-

ты. Радиолокация позволяет обеспечить безаварийное плавание судов, управлять движением самолетов, производить их посадку ночью и в плохую погоду.

Радионавигация кроме радиолокаторов использует различные радионавигационные приборы, позволяющие осуществлять уверенное вождение самолетов и кораблей в любых метеорологических условиях.

Радиоастрономия в настоящее время является одним из мощных средств изучения Вселенной. При помощи радиотелескопов ведется наблюдение за радиоизлучением Солнца и других планет. Это дает возможность судить о составе вещества планет и строении их поверхности. В связи с тем что большая часть радиоизлучения планет поглощается атмосферой и не доходит до поверхности Земли, используется специальное оборудование на искусственных спутниках Земли. Весной 1963 года систематически поддерживалась связь с запущенной с Земли межпланетной станцией Марс-1. При этом впервые удалось осуществить двустороннюю радиосвязь на расстоянии свыше 100 млн. км. За последнее время стали применять телевизионные астрономические системы, которые позволяют наблюдать на экране телевизора яркое изображение участка звездного неба.

Радиотелеметрия дает возможность измерять различные величины на расстоянии. Радиотелеметрическое оборудование, установленное на спутниках Земли, позволяет изучать процессы, происходящие на космическом корабле на различных высотах, поведение живого организма в условиях космического полета, состав околоземного пространства и его влияние на живые организмы.

Особенностью радиотехники является передача информации на большие расстояния при помощи электромагнитных волн высокой частоты. Но радиотехнические методы также широко используют для решения задач, не связанных с излучением электромагнитных волн. Появился новый термин *радиоэлектроника*, включающая в себя радиотехнику и электронику.

Радиоэлектроника широко внедряется во все отрасли народного хозяйства. Она имеет решающее значение в автоматизации производственных процессов, дает возможность быстро производить химические анализы различных веществ. При помощи высокочастотных установок плавят металлы, закаливают их, сушат древесину, текстиль, обрабатывают пищевые продукты.

Большое применение находит радиоэлектроника в медицине — при определении заболевания и для лечения. Электрокардиограф позволяет записывать биотоки сердца на ленту. По этой записи врач судит о работе сердца. Для лечения некоторых заболеваний применяют диатермию — нагрев некоторых участков тела токами высокой частоты.

Велики перспективы применения радиоэлектроники в сельском хозяйстве. Разработаны электронные устройства, называемые радиодублерами, которые позволяют одному трактористу одновременно управлять двумя и более тракторами. При помощи электронных измерительных приборов можно наблюдать жизнедеятельность растений и животных и активно влиять на жизненные процессы.

За последнее время получила широкое развитие одна из наиболее интересных отраслей современной науки — кибернетика. Кибернетика — наука, которая занимается вопросами управления и связи. Кибернетические устройства представляют собой быстродействующие электронные системы, выполняющие в короткое время такие сложные задачи, на решение которых человеку требуются многие годы.

За последние годы в радиотехнике появилось много принципиально новых устройств, безгранично расширяющих области ее применения. В настоящее время ведутся работы по использованию световых волн для передачи и приема звуковых и телевизионных программ.

Радиоэлектроника развивается чрезвычайно быстро. Коммунистическая партия и Советское правительство высоко оценивают роль радиоэлектроники в развитии народного хозяйства. И нет сомнения в том, что и в дальнейшем достижения радиоэлектроники явятся ценным вкладом в создание материально-технической базы коммунизма.

§ 2. ПРИНЦИПЫ РАДИОПЕРЕДАЧИ И РАДИОПРИЕМА

Связь между корреспондентами при помощи передачи и приема энергии радиоволн называется *радиосвязью*. В зависимости от назначения передаваемых сигналов радиосвязь делят на радиотелеграфию, радиотелефонию, радиофототелеграфию, телевидение и радиовещание.

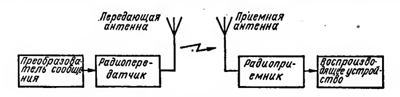


Рис. 1. Упрощенная структурная схема радиосвязи

Радиосвязь бывает одно- и двусторонней. Передачу сообщений в одном направлении применяют, например, при радиовещании и телевидении. При этом сигналы передатчика одновременно принимаются многими приемниками. Упрощенная структурная схема односторонней радиосвязи показана на рис. 1. Радиопередатчик вырабатывает ток высокой (несущей) частоты. Преобразователь сообщения управляет высокочастотными колебаниями передатчика, изменяя форму тока. Этот процесс называют *модуляцией*, а полученные при этом колебания называют *модулированными колебаниями*. Модулированный ток, действующий в передающей антенне, вызывает излучение электромагнитной энергии в окружающее пространство в виде радиоволн.

Пересекая приемную антенну, радиоволны наводят в ней переменную э. д. с. В радиоприемнике э. д. с. принятого сигнала усиливается. Затем происходит процесс, обратный модуляции, — выделение из модулированных колебаний того сообщения, которое управляло радиопередатчиком. Этот процесс называют *детектированием*. В результате

Таблица 1

Классификация радиоволн

Номер диапазона	Наименование диапазона	Крайние длины волн, м	Крайние частоты, Гц	Важнейшие области применения
4	Мириаметровые (сверхдлиниые)	10^5—10^4	$3\cdot10^3$—$3\cdot10^4$	Радионавигация, грозовое предупреждение
5	Километровые (длиииые)	10^4—10^3	$3\cdot10^4$—$3\cdot10^5$	Радиосвязь, радиоиавигация
6	Гектометровые (средиие)	10^3—10^2	$3\cdot10^5$—$3\cdot10^6$	Радиосвязь, радиовещаиие, радиоиавигация
7	Декаметровые (короткие)	10^2—10	$3\cdot10^6$—$3\cdot10^7$	Радиосвязь, радиовещаиие
	Ультракороткие:			
8	метровые	10—1	$3\cdot10^7$—$3\cdot10^8$	Радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиолокация, радиорелейная связь, радиоавигация и др.
9	дециметровые	1—0,1	$3\cdot10^8$—$3\cdot10^9$	
10	сантиметровые	0,1—0,01	$3\cdot10^9$—$3\cdot10^{10}$	
11	Миллиметровые	0,01—0,001	$3\cdot10^{10}$—$3\cdot10^{11}$	Диапазоны осваиваются для различных применеиий
12	Децимиллиметровые	0,001—0,0001	$3\cdot10^{11}$—$3\cdot10^{12}$	

детектирования получается ток, который приводит в действие воспроизводящее устройство, например телефон или громкоговоритель.

Двустороннюю связь применяют для радиосвязи. Для осуществления такой связи каждая радиостанция должна иметь и передатчик, и приемник.

Радиоволны распространяются в пространстве со скоростью света, равной 300 000 км/с. Определенной частоте или периоду колебаний в антенне соответствует определенная длина волны.

Длиной волны называется расстояние, на которое распространяется электромагнитная энергия в течение одного периода колебаний в антенне. Длина волны

$$\lambda = vT \text{ м},$$

где v — скорость распространения электромагнитной энергии, м/с; T — период колебаний.

Так как $T = \frac{1}{f}$ (где f — частота, Гц), то $\lambda = \frac{v}{f}$, а $f = \frac{v}{\lambda}$.

Радиоволны занимают спектр частот примерно от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Этот спектр разбивают на отдельные диапазоны, наименования которым даны по длинам волн. В табл. 1 приведена классификация радиоволн (номера и наименования диапазонов) согласно регламенту радиосвязи.

Для каждого диапазона в табл. 1 указаны крайние длины волн и соответствующие крайние частоты. Так, для 4-го диапазона (мириаметровые волны) длине волны $\lambda_1 = 10^5$ м соответствует частота

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^5} = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц},$$

а длине волны $\lambda_2 = 10^4$ м соответствует частота

$$f_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{10^4} = 3 \cdot 10^4 \text{ Гц}.$$

Разность между крайними частотами составляет полосу частот F каждого диапазона: $F = f_2 - f_1$. Для 4-го диапазона полоса частот $F = 3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^3 = 2{,}7 \cdot 10^4$ Гц.

Приведем значения ширины полосы частот для всех диапазонов:

Номер диапазона	4	5	6	7	8
Полоса частот, Гц	$2{,}7 \cdot 10^4$	$2{,}7 \cdot 10^5$	$2{,}7 \cdot 10^6$	$2{,}7 \cdot 10^7$	$2{,}7 \cdot 10^8$
Номер диапазона	9	10	11	12	
Полоса частот, Гц	$2{,}7 \cdot 10^9$	$2{,}7 \cdot 10^{10}$	$2{,}7 \cdot 10^{11}$	$2{,}7 \cdot 10^{12}$	

Как видим, с увеличением номера диапазона, т. е. по мере перехода к диапазону более коротких волн, полоса частот становится все шире.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение тока высокой частоты в радиопередатчике?
2. Какие процессы называют модуляцией и детектированием?
3. Определите длины волн, соответствующие частотам: 300 кГц, 900 кГц, 5 МГц, 15 МГц.
4. Определите частоты, соответствующие длинам волн: 3 м, 15 м, 60 м, 300 м.
5. Сколько имеется свободных волн для радиовещательных станций в 5-м и 8-м диапазонах (километровые и метровые волны), если для каждой станции нужна полоса частот 9 кГц?

Глава II

ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

В электронных приборах происходит управляемое движение электрических зарядов в вакууме, разреженном газе или полупроводнике. В соответствии с этим различают следующие типы приборов: вакуумные электронные; ионные, или газоразрядные; полупроводниковые.

Основные свойства электрона. Согласно современной электронной теории вещество имеет атомное строение. Атом любого элемента состоит

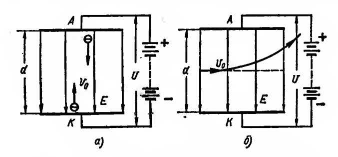


Рис. 2. Движение электрона в однородном электрическом поле:

а — начальная скорость параллельна силовым линиям поля, *б* — начальная скорость перпендикулярна силовым линиям поля

из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются на определенных орбитах электроны. Электроном называется очень малая материальная частица, обладающая наименьшим отрицательным электрическим зарядом. Ядро каждого атома, кроме атома водорода, состоит из определенного количества элементарных частиц — нейтронов и протонов. Нейтрон электрически нейтрален. Протон имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона. Масса протона $1{,}66 \times \times 10^{-24}$ г, что меньше массы нейтрона на $^1/_{125}$ и в 1840 раз больше массы электрона. Число протонов в ядре соответствует атомному номеру элемента.

Движение электрона в электрическом и магнитном поле. В электронных приборах движение электронов происходит под действием электрического или магнитного поля.

Вначале рассмотрим д в и ж е н и е э л е к т р о н а в э л е к т р и ч е с к о м п о л е. Представим себе, что в баллоне, из которого удален воздух, помещены две параллельные пластины — анод A и катод K (рис. 2, *а*). Присоединим к этим пластинам батарею с напряжением U (плюс к аноду и минус к катоду); между анодом и катодом образуется электрическое поле.

Напряженность этого поля

$$E = \frac{U}{d},$$

где d — расстояине между пластинами.

Снловые линии этого поля направлены от анода к катоду. Из катода K вылетают электроны, обладающне иекоторой начальиой скоростью v_0. На электрон, иаходящнйся в электрнческом поле, действует сила $F = eE$, стремящаяся переместить электрон иавстречу электрическому полю. При движеиии скорость электроиа возрастает. Ои приобретает кннетнческую энергию $\frac{mv^2}{2}$, равную работе, которую затрачивает поле иа его перемещение. Эта работа равна произведеиию силы иа путь:

$$Fd = eEd = eU.$$

Такнм образом,

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

Отсюда находим скорость электрона в коице пути

$$v = \sqrt{2\frac{e}{m}U}. \qquad (1)$$

Подставив значеине отиошеиия $\frac{e}{m}$, получим

$$v\ [\text{км/с}] \approx 600\sqrt{U\,[\text{В}]}. \qquad (2)$$

Еслн, напрнмер, напряжеиие U между электродами равио 200 В, то скорость электроиа в конце путн

$$v = 600\sqrt{200} \approx 8460\ \text{км/с}.$$

Мы рассмотрелн двнженне электрона в ускоряющем поле. Рассмотрнм также двнженне электрона в тормозящем поле. Пусть электрои, находнвшнйся вначале у анода, получнл начальиый толчок в направленнн к катоду. В этом случае действующая иа электрон снла F направлена иавстречу скорости электроиа v; электрнческое поле тормознт двнженне электрона. Кннетнческую энергню, которую приобрел электрон в момент иачального толчка, он отдает при движенни в тормозящем электрическом поле.

Пусть, наконец, электрон первоиачально двнгался поперек электрнческого поля (рнс. 2, *б*). Под действнем снл этого поля он отклоняется от прямолинейиого путн в сторону аиода. Прн этом степень отклонення зависнт от первоиачальиой скоростн электрона н иапряжеиностн электрнческого поля.

Теперь рассмотрнм д в и ж е н и е э л е к т р о и а в м а г и н т н о м п о л е. Пусть электрои двнжется со скоростью v в одиородном магинтиом поле, т. е. в поле, силовые лнннн которого прямолниейны,

параллельны между собой и имеют одинаковую густоту. Сила F, с которой поле действует на электрон, зависит от напряженности магнитного поля H, величины и направления начальной скорости v_0. Направление силы F можно определить по правилу буравчика. Если вращать ручку буравчика от H к v_0 (рис. 3, *а*), то поступательное движение буравчика совпадет с направлением силы F. Таким образом, сила F перпендикулярна направлению силовой линии магнитного поля и направлению скорости электрона.

Рассмотрим несколько случаев движения электрона в однородном магнитном поле.

1. Начальная скорость электрона равна нулю. В этом случае сила F равна нулю, т. е. на неподвижный электрон магнитное поле не оказывает влияния.

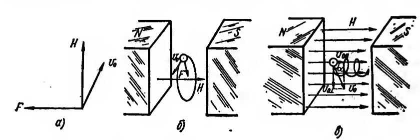


Рис. 3. Движение электрона в однородном магнитном поле:
а — правило буравчика, *б* — v_0 направлена перпендикулярно силовым линиям поля, *в* — v_0 направлена под углом α к силовым линиям поля

2. Начальная скорость электрона не равна нулю, но направлена вдоль силовых линий поля. И в этом случае сила F равна нулю, т. е. электрон движется вдоль силовых линий, не меняя ни величины, ни направления скорости.

3. Начальная скорость электрона не равна нулю, но направлена перпендикулярно силовым линиям. В этом случае электрон под действием силы F движется по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной силовым линиям (рис. 3, *б*).

4. Начальная скорость не равна нулю, но направлена к силовым линиям поля под некоторым углом α. Скорость v_0 можно разложить на составляющую $v_0 \parallel$, направленную вдоль силовых линий, и составляющую $v_0 \perp$, направленную перпендикулярно силовым линиям поля. Под действием $v_0 \parallel$ электрон движется, как и в случае 2, вдоль силовых линий, а под действием $v_0 \perp$, как и в случае 3, — по окружности. Под действием обеих составляющих электрон движется по спирали, ось которой направлена параллельно силовым линиям поля (рис. 3, *в*).

Виды электронной эмиссии. Источниками свободных электронов являются металлы, в которых внешние (валентные) электроны слабо связаны с атомами и легко от них отделяются. Скорости этих электронов в металле имеют различную величину и направление. Электроны, имеющие бо́льшую скорость, могут подходить изнутри к поверхности металла и вылетать во внешнее пространство. Когда электроны поки-

дают металл, они лишают его отрицательных зарядов; поэтому металл заряжается положительно и притягивает к себе вылетающие электроны. Для преодоления этой силы притяжения электрон должен затратить некоторую энергию W_0, которую называют *работой выхода*.

При комнатной температуре лишь незначительная часть электронов обладает кинетической энергией, достаточной для совершения работы выхода. Существуют различные способы повышения энергии электронов и в зависимости от этого различают виды выделения из металла свободных электронов, т. е. виды электронной эмиссии.

При нагревании металла кинетическая энергия и скорость электронов увеличиваются и могут стать достаточными, чтобы электроны могли совершить работу выхода. Получаемая в результате нагревания металла эмиссия называется *термоэлектронной*.

Электроны, падающие на металл и называемые первичными, могут выбить из него другие электроны, называемые вторичными. Работа выхода вторичных электронов совершается за счет энергии первичных электронов. Такой вид эмиссии называется *вторичной электронной эмиссией*.

При воздействии на металл световой энергии электронам может быть сообщена такая кинетическая энергия и скорость, что они смогут совершить работу выхода. Получаемая в результате этого эмиссия называется *фотоэлектронной*.

В большинстве электронных ламп используется термоэлектронная эмиссия, которая заключается в том, что проводник, накаливаемый до высокой температуры, выделяет в окружающее пространство свободные электроны. Проводник, предназначенный для эмиссии электронов, называется *катодом* или *эмиттером*.

§ 4. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О КАТОДАХ (ЭМИТТЕРАХ)

Катоды различают в зависимости от материалов, из которых они изготовлены (катоды из чистых металлов; пленочные, или активированные; полупроводниковые катоды), и по способу нагревания (прямого накала, косвенного накала). Различные металлы обладают различной работой выхода, а следовательно, различными эмиссионными способностями. Наиболее выгодными являются те металлы, которые обладают малой работой выхода и могут выдержать высокие рабочие температуры.

Катоды из чистых металлов. К этому типу относят вольфрамовый катод. Вольфрам имеет наивысшую температуру плавления (3382° С), обладает хорошей ковкостью и тягучестью. Эмиссия электронов получается при 2000° С. Основными достоинствами вольфрамового катода являются постоянство его эмиссионных свойств и способность паров вольфрама вступать в химические соединения с газами, остающимися в лампе после откачки, чем улучшается обезгаживание лампы. Вольфрамовые катоды применяют в мощных лампах.

Пленочные катоды. Недостатком вольфрамового катода является большая работа выхода. Для уменьшения работы выхода вольфрамовую проволоку покрывают активным слоем. Раньше применялись то-

рированные катоды, в которых к вольфраму добавлялось небольшое количество тория. Недостаток этих катодов — чувствительность к перегреву, что приводит к резкому уменьшению тока эмиссии и сокращению срока службы катода. Более совершенными являются *карбидированные катоды*, в которых к вольфраму добавляется торий и углерод. Они могут работать при более высоких температурах без разрушения активного слоя. Их применяют в лампах с повышенным напряжением.

Полупроводниковые катоды. К этой группе относят наиболее широко применяемый в электронных и ионных приборах *оксидный катод*. Он представляет собой никелевый или вольфрамовый керн, покрытый слоем окислов бария, стронция и кальция. Оксидные катоды обладают меньшей работой выхода. Это позволяет получить большую термоэлектронную эмиссию при сравнительно невысоких температурах (630—830° С).

Катоды прямого накала нагреваются протекающим через них током. В большинстве случаев их нельзя накаливать переменным током. Ввиду малой тепловой инерции температура катода периодически изменяется, вызывая соответствующие изменения тока эмиссии. Катоды прямого накала применяют в экономичных лампах, например в лампах, рассчитанных на питание от сухих батарей или аккумуляторов.

Катоды косвенного накала состоят из самого катода, испускающего электроны, и нити накала, выполняющей функцию подогревателя. Катодом является никелевая трубочка, покрытая оксидным слоем. Нить накала — вольфрамовая проволока, имеющая вид спирали или петли, на которую наносят жароупорный изоляционный материал (алунд). Такой катод обладает большой тепловой инерцией, что позволяет накаливать его переменным током. Недостатком такого катода является то, что на его прогрев требуется много времени (от 15 до 25 с).

Работа катодов характеризуется рядом параметров. Основными параметрами являются удельная эмиссия, удельная мощность накала, эффективность, долговечность и рабочая температура.

Удельная эмиссия I_{eq}(мА/см^2) — это величина тока электронной эмиссии с одного квадратного сантиметра поверхности катода при нормальной рабочей температуре. Удельная эмиссия зависит от температуры, поверхности и свойств материала, из которого изготовлен катод.

Удельная мощность накала $P_{нq}$(Вт/см^2) — это мощность накала, приходящаяся на 1 см^2 поверхности катода. В рабочих условиях мощность, подводимая от источника накала, равна мощности, теряемой катодом. Основная часть мощности расходуется на излучение тепла в пространство и лишь незначительная ее часть расходуется на отвод тепла держателями катода и изоляторами и на энергию, уносимую эмиттируемыми электронами.

Эффективность (экономичность) H (мА/Вт) — это отношение полного тока эмиссии катода при нормальной рабочей температуре к мощности, затрачиваемой на его нагревание. Другими словами, эффективность катода — это величина тока эмиссии в миллиампе-

рах, приходящаяся иа 1 Вт мощиости иакала. Более экоиомнчиыми являются актнвнрованные, в особенностн оксидные, катоды.

Д о л г о в е ч н о с т ь (с р о к с л у ж б ы) τ (ч). Для катодов из чистых металлов срок службы — это время, в течеине которого днаметр катода уменьшается на 10%; для пленочиых и полупроводинковых катодов — это время, в теченне которого ток эмиссин составляет ие менее 80% номнинального значення.

Р а б о ч а я т е м п е р а т у р а T (град) — это температура эмиттнрующей поверхиости катода в иормальных рабочнх условиях.

§ 5. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Электроииая лампа кроме катода содержнт аиод н сеткн. По числу электродов различают следующне типы ламп: двухэлектродные лампы (дноды), трехэлектродные (триоды), четырехэлектродные (тетроды), пятнэлектродные (пентоды), шестнэлектродные (гексоды), семнэлектродные (гептоды), восьмнэлектродные (октоды). Кроме того, прнменяют комбнннрованные лампы, нмеющне в одиом баллоне несколько ламп: двойной днод, двойиой трнод, двойной диод-триод, двойиой диод-пеитод и др.

Основными частями электроииой лампы являются: электроды (катод, анод н сеткн) н баллон (колба), внутри которого образоваи вакуум н помещены электроды.

Электроды ламп. К а т о д ы ламп и их коиструкцнн рассмотреиы нами выше. А и о д ы ламп могут нметь цнлнндрическую илн прямоугольиую форму. Для нзготовлення анодов служат инкель и некоторые лнстовые матерналы, например алюмнинрованные сталь н ннкель. С е т к и обычио нзготовляют в виде спнрали. Материалом для внтков сеткн служит проволока нз молнбдена, вольфрама, марганцовнстого ннкеля н сплавов иикеля с вольфрамом и молнбденом. Чтобы прндать сеточной спнралн необходнмую жесткость, ее внтки прнваривают к проволочным держателям — траверсам.

Электроды ламп обычно монтнруют на ножке. По коиструкцни ножки бывают гребешковые н плоскне. Гребешковые иожкн нмеют большую длнну, что увеличивает габарнты лампы. Большая длниа вводов обусловливает нх большую ннлуктнвность н большую емкость между нними, поэтому гребешковые ножки можно встретнть лншь в лампах старых выпусков. В лампах новых выпусков применяют плоскне ножки, достоннствамн которых являются малые габарнты н малая длина вводов, возможность разнестн вводы иа большне расстояиня. Во многих конструкцнях сверхмннннатюриых ламп вообще иет ножек. Вводы этнх ламп запаивают в ннжнюю расплющеиную часть баллона.

Для откачки воздуха виутри иожкн помещают тонкую стеклянную трубочку — штеигель. В бесцокольных стекляиных и пальчнковых лампах воздух откачнвают через штенгель, впаянный в купол баллона. Вакуум в лампе доводнтся до 10^{-6}—10^{-7} мм рт. ст. Для улучшеиня вакуума внутри баллона помещают *геттер* (*газопоглотитель*). Прн иагреве ои распыляется н связывает химически н отчасти фнзически остатки воздуха внутрн баллоиа.

Баллоны ламп. В завнснмости от матернала баллоиа лампы бывают стеклянными, металлостекляинымн, металлокерамическими. Стеклянные баллоиы для ламп с гребешковыми ножкамн нзготовляют нз доломитового стекла, а для пальчиковых н сверхмниатюриых ламп — нз свинцового стекла. Баллоны металлнческнх ламп выполняют, как правило, из углероднстой стали, покрываемой спецналььным лаком для предохранеиия их от коррозии.

§ 6. ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ (ДИОДЫ)

Устройство диода

Диод является простейшей электроиной лампой. Кроме катода K в стекляином илн металлнческом баллоие имеется положительно заряжениый электрод A — анод. Для подключення лампы к схеме через основаиие или стеикн баллона делают металлические выводы от ее электродов. На рис. 4 изображеиы схемы включения в электрическую цепь днода с катодом прямого накала н с катодом косвенного накала.

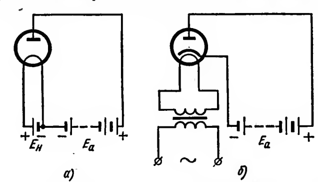


Рис. 4. Схемы включения диода в электрическую цепь:
а — с катодом прямого накала, *б* — с катодом косвенного накала

Батарея $E_н$, иакаливающая катод, изывается *батареей накала*, а цепь, образоваинай этой батареей н ннтью иакала, иазывается *цепью накала*. Батарея $E_а$, включениая между анодом и катодом, изывается *анодной батареей*, а цепь, составлеиная этой батареей и простраиством аиод — катод лампы, называется *анодной цепью*. Разиость потеициалов между анодом и катодом изывают *анодным напряжением*.

При иакале до иеобходимой температуры катод начинает эмнттировать электроны. Включим аиодиую батарею $E_а$ положительиым полюсом к аиоду, а отрицательиым к катоду. Под действием электрического поля между аиодом и катодом вылетевшие нз катода электроны иачиут перемещаться к аиоду. Промежуток аиод — катод замкнется электронным потоком, и во внешней цепн возиикнет ток, изываемый *анодным током*. Хотя электроны в лампе летят от катода к аиоду, направление

тока условно принимают обратным движению электронов, т. е. от анода к катоду или от положительного зажима батареи к отрицательному.

Если изменить полярность включения батареи, т. е. подключить ее положительный полюс к катоду, а отрицательный к аноду, то электроны, отталкиваемые отрицательным полем анода, возвратятся на катод. Анодного тока не будет. Следовательно, внутри диода ток может протекать лишь в одном направлении — от анода к катоду. Это показывает, что диод обладает выпрямительным свойством. Диод является вентилем, т. е. прибором, пропускающим ток только в одном направлении.

Анодная батарея создает для электронов, вылетевших из катода, ускоряющее поле. Но электроны, находящиеся между катодом и анодом, образуют электронное облачко, так называемый *пространственный*, или *объемный, заряд*, препятствующий движению электронов к аноду. Таким образом, на движение электронов от катода к аноду действует результирующая сила, образованная ускоряющим полем анодной батареи и тормозящим полем пространственного заряда.

Характеристики диода

Для каждой лампы важно знать ее вольт-амперную характеристику, т. е. зависимость анодного тока от анодного напряжения:

$$I_а = \varphi(U_а).$$

На рис. 5, *а* изображены вольт-амперные характеристики, снятые при напряжениях накала $U_{н1}$, $U_{н2}$ и $U_{н3}$. Рассмотрим характеристику, снятую при напряжении $U_{н1}$. Эту характеристику можно разделить на две части — восходящую OA и пологую AB.

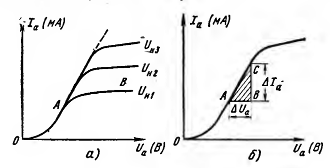


Рис. 5. Диод:
а — характеристики, *б* — характеристический треугольник

Когда анодное напряжение $U_а$ равно нулю, ток анода также равен нулю, так как электроны не притягиваются анодом. При малом анодном напряжении большое влияние на движение электронов оказывает тормозящее действие пространственного заряда. На анод попадает только часть вылетевших из катода электронов; анодный ток нарастает медленно. Но по мере увеличения анодного напряжения все большее

колнчество электронов попадает на анод; анодный ток быстро растет. Пространственный заряд прн этом все больше рассасывается.

В восходящей частн характернстнкн OA ток в цепн анода определяется отрнцательным пространственным зарядом у катода. Режнм, определяемый этой частью характернстнкн, называется *режимом пространственного заряда*. В этом режнме анодный ток меньше тока эмнсснн.

Прн дальнейшем увелнченнн анодного напряження ускоряющее поле анода становнтся настолько большнм, что пространственный заряд полностью рассасывается, н все электроны, вылетевшне нз катода, попадают на анод. Это соответствует пологой частн характернстнкн AB. Режнм, прн котором на анод попадают все электроны, вылетевшне нз катода, называется *режимом насыщения*. В этом режнме анодный ток прнмерно равен току эмнсснн.

Сравненне характернстнк, снятых прн бо́льшнх напряженнях накала $U_{н2}$ н $U_{н3}$, показывает, что в восходящей частн онн почтн совпадают, но по мере увелнчення напряження накала ток насыщення наступает прн большем значеннн напряження $U_а$, н предельное значенне тока растет. В современных лампах в режнме насыщення ток $I_а$ продолжает растн с увелнченнем $U_а$. У оксндных катодов насыщенне мало заметно, так как электрнческое поле анода, проннкая в толщу оксидного слоя, вырывает нз него электроны н создает дополннтельную (автоэлектронную) эмнссню, завнсящую от анодного напряження.

Параметры диода

Свойства лампы характернзуются ее основнымн параметрамн — крутнзной S н внутренннм сопротнвленнем R_i.

Крутизна лампы показывает, на сколько мнллнампер нзменнтся анодный ток, еслн нзменнть анодное напряженне на 1 В, н определяется как отношенне велнчнны нзменення анодного тока $\Delta I_а$ к велнчнне соответствующего нзменення напряження на аноде $\Delta U_а$:

$$S = \frac{\Delta I_а}{\Delta U_а}. \tag{3}$$

Внутреннее сопротивление. Отношенне нзменення анодного напряження $\Delta U_а$ к вызванному нм нзмененню анодного тока $\Delta I_а$ характернзует сопротнвленне, которое оказывает днод переменному току. Это сопротнвленне называется внутреннмм сопротнвленнем лампы:

$$R_i = \frac{\Delta U_а}{\Delta I_а}. \tag{4}$$

Внутреннее сопротнвленне является велнчнной, обратной крутнзне лампы:

$$R_i = \frac{1}{S}. \tag{5}$$

Для определення S и R_i можно воспользоваться треугольннком ABC, построенным на характернстнке днода (рнс. 5, *б*). Катет AB

обозначает изменение анодного напряжения ΔU_a, а катет BC — соответствующее изменение анодного тока ΔI_a. Крутизну и внутреннее сопротивление обычно определяют в середине прямолинейного участка характеристики.

К основным параметрам диода следует добавить дополнительные параметры: допустимую мощность рассеяния на аноде и наибольшее обратное напряжение.

Допустимая мощность рассеяния на аноде. Быстро летящие электроны, ударяясь о поверхность анода, отдают ему свою кинетическую энергию, которая выделяется в виде тепла. Мощность, отдаваемая электронами аноду,

$$P_a = I_a U_a.$$

Если мощность P_a превосходит мощность, которую анод рассеивает в окружающее пространство, температура анода повышается. Это может привести к деформации анода и разрушению активного слоя катода, находящегося вблизи перегретого анода. Чтобы лампа не вышла из строя, мощность P_a не должна превышать максимально допустимую мощность рассеяния $P_{a.\,макс}$.

Наибольшее обратное напряжение $U_{обр}$. Если анод в процессе работы нагреется до высокой температуры, то может возникнуть термоэлектронная эмиссия с его поверхности. При больших отрицательных напряжениях на аноде через лампу проходит небольшой ток обратного направления, который может привести к пробою лампы.

Применение диодов

Диоды служат для выпрямления переменного тока и детектирования. Диоды, применяемые для выпрямления переменного тока, называются *кенотронами*. В зависимости от назначения кенотроны делятся на маломощные и мощные, высоковольтные (для выпрямления высоких напряжений) и низковольтные, одноанодные и двуханодные. Некоторые типы кенотронов: 1Ц11П, 5Ц12П, 6Ц4П, 6Ц10П, 6Ц19П. Для детектирования используют диоды с малым рабочим током. Размеры этих диодов небольшие. В большинстве случаев эти диоды выполняют сдвоенными или комбинируют с триодом или пентодом. Некоторые типы детекторных диодов: 6Д6А, 6Х2П, 6Х7Б.

§ 7. ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ (ТРИОДЫ)

В триоде кроме катода и анода имеется управляющая сетка, расположенная между ними. Сетка предназначена для управления анодным током. Она расположена вблизи катода, поэтому небольшие изменения напряжения на сетке вызывают большие изменения анодного тока. Электроны, эмиттируемые катодом, могут пролетать сквозь сетку к аноду. Но количество долетающих электронов зависит от напряжения на сетке. Если напряжение, подводимое к сетке, отрицательно, она тормозит движение электронов. Можно подать на сетку отрицательное напряжение такой величины, что анодный ток полностью прекратится. Сеточное

напряжеиие такой величииы называется запнрающнм. Но, еслн увелнчивать иапряжеиие на сетке, анодный ток будет возрастать. Когда напряжеиие на сетке положительное, между ней н катодом образуется дополнительиое ускоряющее поле, поток электронов перехватывается сеткой н появляется сеточиый ток. Чаще всего трнод должен работать в схеме без сеточного тока, поэтому на сетку подают отрицательиое напряжение.

Такнм образом, увеличивая или умеиьшая иапряжение иа сетке, увеличивают или уменьшают аиодный ток. В этом н заключается управляющее действне сетки лампы.

Характеристики триода

На рнс. 6 нзображены схемы цепей трнода с катодом прямого н косвеиного накала. В отличие от диода в трноде нмеется цепь сетки, составлеииая батареей сетки и пространством сетка — катод. Потенцнал

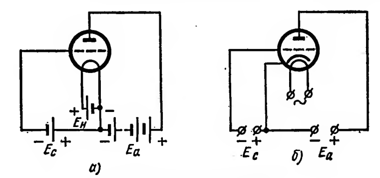


Рис. 6. Схемы цепей триода:
а — с катодом прямого накала, *б* — с катодом косвенного накала

катода обычио принимают равиым нулю. Поэтому потеицналы другнх электродов — сеткн н анода — отсчитывают отиосительно этого условиого иуля. Анодный ток триода завнсит от тока накала и потенцналов его сетки н аиода. В рабочнх условиях напряжеиие иакала в лампе поддерживается постояииым и равиым его номииальиому зиачению. Тогда аиодиый ток зависит от аиодиого и сеточного иапряжеиий:

$$I_а = \varphi(U_а, U_с).$$

Чтобы выясиить влняиие одиого из этнх напряжеиий, другое поддерживают постояиным. В соответствии с этим выясняют две завнснмости аиодиого тока:

зависимость анодного тока от иапряження на управляющей сетке при постоянном анодном напряжении: $I_а = \varphi(U_с)$ при $U_а = \text{const}$; эту зависимость называют *анодно-сеточной характеристикой триода*;

зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении на управляющей сетке: $I_а = f(U_а)$ при $U_с = \text{const}$; эту зависимость называют *анодной характеристикой триода.*

Пользуясь анодно-сеточной характеристикой, можно определить величину анодного тока при заданном напряжении на сетке.

На рис. 7, *а* изображено семейство анодно-сеточных характеристик триода $I_а = \varphi(U_с)$, снятых при анодном напряжении $U_а$, равном 300,

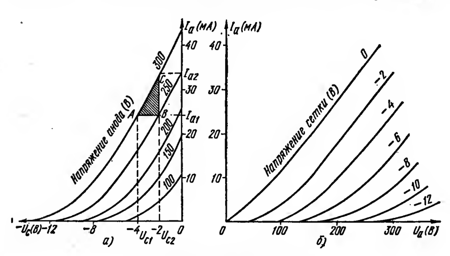


Рис. 7. Семейства характеристик триода:
а — анодно-сеточных, *б* — анодных

250, 200, 150, 100 В. Как видно, при увеличении анодного напряжения характеристики сдвигаются влево, а при уменьшении — вправо. На рис. 7,*б* показано семейство анодных характеристик триода $I_а = f(U_а)$, снятых при напряжении на сетке $U_с$, равном 0, —2, —4, —6, —8, —10, —12В. Характеристика, снятая при $U_с = 0$, расположена так же, как и характеристика диода, и начинается при $U_а = 0$. При увеличении отрицательного напряжения на сетке характеристики сдвигаются вправо и начинаются при бо́льших значениях напряжения на аноде.

Параметры триода

Параметрами триода являются крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления лампы.

Крутизна характеристики S показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении сеточного напряжения на 1 В при постоянном анодном напряжении:

$$S = \frac{\Delta I_а}{\Delta U_с} \text{ (мА/В) при } U_а = \text{const}. \quad (6)$$

Чем больше эффективная поверхность анода (поверхность, на которую падают электроны) и меньше расстояние сетка — катод, тем больше крутизна лампы. Для различных ламп крутизна имеет различную величину (примерно 1—30мА/В). Чем круче анодно-сеточная характеристика, тем больше ее крутизна. В восходящей части характеристики величина S больше, а на нижнем и верхнем изгибах характеристики эта величина меньше.

Внутреннее сопротивление лампы R_i равно отношению изменения анодного напряжения к вызванному им изменению анодного тока при постоянном напряжении на сетке.

$$R_i = \frac{\Delta U_а}{\Delta I_а} \text{ (Ом) при } U_с = \text{const}. \qquad (7)$$

R_i — это сопротивление, которое лампа оказывает переменной составляющей анодного тока. Внутреннее сопротивление лампы зависит от конструкции электродов. Так, чем меньше эмиссия катода, чем гуще сетка и чем дальше анод от катода, тем больше R_i. Для различных ламп R_i имеет различную величину (примерно 500—100 000 Ом). В прямолинейной части характеристики величина R_i приблизительно постоянна и имеет минимальное значение. На нижнем и верхнем изгибах R_i увеличивается.

Сопротивление, которое лампа оказывает постоянной составляющей анодного тока, или, как говорят, сопротивление постоянному току, определяется по закону Ома делением анодного напряжения $U_а$ на анодный ток $I_а$:

$$R_0 = \frac{U_а}{I_а}. \qquad (8)$$

Коэффициент усиления лампы μ — это отношение изменения анодного напряжения к соответствующему изменению сеточного напряжения, если анодный ток остается постоянным.

$$\mu = \frac{\Delta U_а}{\Delta U_с} \text{ при } I_а = \text{const}.$$

Коэффициент усиления μ показывает, во сколько раз изменение сеточного напряжения сильнее влияет на изменение анодного тока, чем такое же изменение анодного напряжения. Пусть, например, $\mu = 25$. Это указывает на то, что изменение сеточного напряжения на 1 В вызывает такое же изменение анодного тока, как изменение анодного напряжения на 25 В.

Коэффициент усиления триода зависит в первую очередь от конструкции сетки. Сетка выполняет функцию экрана, который задерживает большую часть силовых линий электрического поля, созданных положительным зарядом анода, и тем самым ослабляет его действие на катод. Чем гуще сетка, тем больше ее экранирующее влияние и соответственно больше коэффициент усиления.

Проиицаемость лампы D обратна ее коэффицнеиту усилеиня:

$$D = \frac{1}{\mu}. \qquad (9)$$

Величниа D показывает, какая часть силовых линий электрнческого поля, созданного анодиым напряжеинем, проиикает сквозь сетку на катод. Чем гуще сетка (меньше шаг спнралн), тем проинцаемость лампы меньше.

Параметры трнода связаны между собой следующнм соотиошеннем:

$$SR_i = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \mu, \qquad (10)$$

т. е. $$SR_i = \mu, \quad \text{нлн} \quad SR_iD = 1.$$

Это соотношеиие изывается *внутренним уравнением триода.*

Параметры триода можио определнть по семейству его характернстнк. На семействе аиодно-сеточиых характеристик (см. рис. 7, *а*) построеи треугольник ABC. Катет AB обозиачает нзмеиеиие сеточиого иапряжеиня $\Delta U_c = U_{c2} - U_{c1}$, а катет BC — нзмеиеиие анодиого тока $\Delta I_a = \Delta I_{a2} - \Delta I_{a1}$.

Измеиеиие аиодного иапряжения определяется, как разиость анодных напряжеиий, прн которых сняты две смежиые характеристнки ($\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1}$). Имея значення ΔI_a, ΔU_c н ΔU_a, можно определить параметры триода:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}; \; \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}; \; R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Параметры ламп непостоянны на всех участках характеристнк. Так, иа иижнем нзгнбе характернстики крутнзна меиьше, чем на ее прямолниейном участке. Виутрениее сопротивлеиие, наоборот, на нняжнем нзгнбе больше, чем иа прямолниейном участке характеристнки. Параметры лампы, прнводнмые в справочннках, соответствуют прямолннейным участкам характернстнк.

Достоннствамн трнодов являются простота их конструкцнн и большой прямолниейный участок анодно-сеточной характернстнкн, недостаткамн — небольшой коэффнцнент уснлення и зиачительные междуэлектродные емкостн.

Небольшой коэффнцнент уснлення обусловлен тем, что сетка недостаточно экраннрует катод от действня аиода н значительиая часть снловых лнннй электрнческого поля анода проиикает через внтки сеткн. Как было указаио выше, чем гуще сетка, тем больше коэффициент уснлення. Но прн очеиь густой сетке электроиы почтн ие могут пролетать от катода к аиоду и аиодный ток очеиь мал. При иебольшом отрнцательном напряженнн на сетке лампа запирается н почтн вся характернстнка располагается в области положнтельных напряженнй иа сетке, прн которых в лампе возиикает сеточный ток, что иежелательно. Между электродами лампы — металлнческнмн проводииками, разделеиными днэлектриком (вакуумом), — имеются электрические емкос-

тн. Емкость между сеткой н катодом $C_{с.к}$ называется *входной емкостью*, между анодом н катодом $C_{а.к}$ — *выходной емкостью*, между анодом и сеткой $C_{а.с}$ — *проходной емкостью*. На низкнх частотах сопротнвленне этнх емкостей велнко н онн практнческн не влняют на работу лампы. Но с повышеннем частоты сопротнвленне емкостей уменьшается н оказывает вредное влнянне на работу лампы. Особенно вредной на высокнх частотах является проходная емкость, создающая нежелательную связь между анодной н сеточной цепямн лампы.

Некоторые тнпы прнемно-усилнтельных ламп; трноды — 6С15П, 6С19П, 6С28Б, 6С35А; двойные трноды — 6Н1П, 6Н14П, 6Н15П, 6Н19П, 6Н23П; двойные дноды-трноды — 6Г1П, 6Г2П, 6Г3П.

§ 8. ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ (ТЕТРОДЫ)

Для устранення недостатков трнода, т. е. для увелнчення коэффнцнента усилення н уменьшення проходной емкостн, между управляющей сеткой н анодом размещают вторую сетку, которая называется *экранирующей*. Получается четырехэлектродная лампа.

Шаг спнралн экраннрующей сеткн делается малым. Вместе с управляющей сеткой она экраннрует катод от поля анода. Проннцаемость между анодом н катодом уменьшается, а коэффнцнент уснлення возрастает. Чтобы получнть анодный ток необходнмой велнчнны, на экранирующую сетку подают положнтельное напряженне $U_{с2} = (0,5 \div 0,8)U_а$. Введенне экраннрующей сеткн намного уменьшает проходную емкость, так как сетка ослабляет электрнческое поле между анодом н управляющей сеткой. Схема включення тетрода показана на рнс. 8,*а*.

Напряженне на экраннрующую сетку подано от анодной батарен через гасящее сопротнвленне $R_{с2}$. Оно меньше напряження нсточннка пнтання на велнчнну падення напряження на сопротнвленнн $R_{с2}$:

$$U_{с2} = E_а - I_{с2}R_{с2}.$$

Экраннрующая сетка соеднняется с катодом через конденсатор $C_{с2}$ большой емкостн н с очень малым сопротнвленнем для прохождення переменной составляющей тока.

Для выяснения завнснмостн анодного тока тетрода от напряженнй на его электродах воспользуемся семейством его статнческнх характернстнк. На рнс. 8,*б* нзображены анодно-сеточные характернстнкн, снятые прн разных напряженнях на аноде н экраннрующей сетке. Увелнченне напряження на экраннрующей сетке на 50 В вызывает значнтельно большнй сдвнг характернстнкн влево, чем такое же увеличение анодного напряження.

Свойства тетрода, как н трнода, характернзуются крутнзной S, внутреннnм сопротивленнем R_i н коэффицнентом уснлення μ. S находнтся в тех же пределах ($1 \div 20$ мА/В), зато R_i н μ значнтельно больше, чем у трнодов: R_i доходнт до сотен тысяч Ом, μ достнгает нескольких сотен.

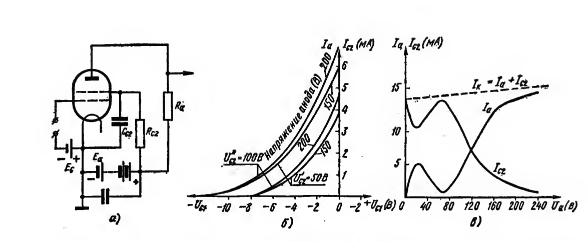


Рис. 8. Тетрод:

а — схема включения, *б* — анодно-сеточные характеристики, *в* — характеристики I_a и I_{c2} при динатронном эффекте

На рис. 8,*в* показаны кривые зависимости тока анода $I_а$ и тока экранирующей сетки $I_{с2}$ от анодного напряжения $U_а$ при постоянном напряжении экранирующей сетки ($U_{с2}$ = const).

Когда напряжение на аноде $U_а$ равно нулю, анодный ток $I_а$ также равен нулю и ток экранирующей сетки равен току катода ($I_{с2} = I_к$). Начнем увеличивать $U_а$, тогда ток $I_а$ начнет возрастать, а ток $I_{с2}$ соответственно уменьшаться. Когда анодное напряжение достигает величины примерно 10—20 В, скорость электронов настолько возрастает, что, ударяясь об анод, они выбивают вторичные электроны.

Так как потенциал экранирующей сетки больше потенциала анода, вторичные электроны устремляются к этой сетке. Ток $I_{с2}$ растет, а ток $I_а$ падает. Такое уменьшение анодного тока при увеличении анодного напряжения называется *динатронным эффектом*. При дальнейшем увеличении анодного напряжения, когда его величина становится близкой к величине напряжения на экранирующей сетке, выбитые вторичные электроны будут возвращаться обратно на анод, ток $I_а$ начнет возрастать, а ток $I_{с2}$ падать. Наличие динатронного эффекта является недостатком тетрода.

§ 9. ЛУЧЕВЫЕ ТЕТРОДЫ И ПЕНТОДЫ

Чтобы устранить динатронный эффект, между анодом и экранирующей сеткой должна быть область с низким потенциалом, тормозящим вторичные электроны и возвращающим их на анод. Создать такую область с низким потенциалом можно либо путем увеличения плотности объемного электронного заряда в пространстве анод — экранирующая сетка, либо путем введения в это пространство специального электрода с потенциалом, значительно меньшим потенциалов анода и экранирующей сетки.

Лучевые тетроды

Область с низким потенциалом в лучевых тетродах создается путем увеличения плотности объемного заряда между анодом и экранирующей сеткой. Чтобы создать такую область, надо увеличить расстояние между анодом и этой сеткой, а также увеличить концентрацию электронов на пути от нее к аноду.

Для этого в лучевом тетроде применена специальная конструкция электродов (рис. 9,*а*). Витки управляющей и экранирующей сеток делают плоскими. Обе сетки имеют одинаковое число витков, расположенных строго в створе. Анод имеет цилиндрическую форму. Чтобы электроны концентрировались в плотные пучки, в лампу помещают две лучеобразные пластины *1*, соединенные с катодом *2*. Эти пластины отталкивают электроны, сжимая поток электронов в пучки. Рассмотренная выше конструкция сеток обеспечивает расчленение пучка на ряд вееров — лучей.

Таким образом, между анодом *3* и экранирующей сеткой образуется отрицательный объемный заряд, который тормозит вылетающие из анода вторичные электроны и возвращает их обратно на анод. Не-

обходимая плотность объемиого заряда может быть достигиута при отиосительио большом аиодиом токе (не меиее 20—50 мА). Провал в характеристиках (рис. 9,*б*), сиятых при U_{c1}, равиом —15, —20, —25, —30 В, объясняется иедостаточиой величнной аиодиого тока.

Аиодные характеристики имеют восходящую и пологую области. При иебольшом аиодном напряжеини, когда измеиеине U_a прнводит к перераспределению токов анода и экранирующей сетки, иебольшое

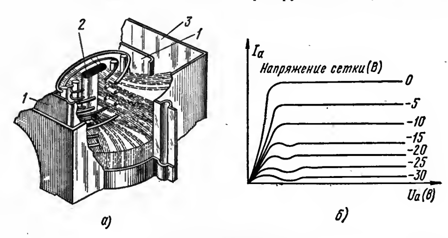


Рис. 9. Лучевой тетрод:
а — конструкция электродов, *б* — анодные характеристики, *1* — лучеобразующие пластины, *2* — катод, *3* — анод

измененне аиодиого напряжеиня вызывает большие измеиеиия анодиого тока (восходящая область). При большом аиодиом иапряжеини измеиеине U_a вызывает лишь небольшое измеиеиие I_a (пологая область), вызванное небольшим изменеинем тока катода.

Лучевые тетроды используют в осиовиом в качестве усилителей мощностн низкой частоты и в схемах геиераторов. Некоторые типы лучевых тетродов: 6П1П, 2П1П, 2П2П, 6Э5П.

Пентоды

В пеитодах устраиеине дниатронного эффекта достигается введеинем между анодом и экраннрующей сеткой еще одиой сеткн, называемой *защитной* или *антидинатронной*. Защнтиая сетка соедниется внутри лампы с катодом или нмеет отдельиый вывод. Низкий потенциал защитиой сетки препятствует попадаиню вторичных электронов иа экраиирующую сетку н тем самым устраияет дниатроиный эффект. Защитную сетку делают довольио редкой. Пеитоды делятся на два типа — высокочастотные н иизкочастотиые.

Высокочастотные пентоды. В коиструкциях высокочастотиых пеитодов предприияты специальиые меры для умеиьшеиия проходиой емкости $C_{a.c}$. С этой целью экранирующую сетку выполняют густой.

Применяют специальную экранировку деталей, связанных с управляющей сеткой, от деталей, связанных с анодом. В некоторых случаях пентоды имеют вывод управляющей сетки иа верху баллоиа, а вывод аиода иа цоколе. Но в современных пентодах все электроды имеют вывод на цоколе и между выводами анода и управляющей сетки размещен специальный экран. Проходная емкость таких пентодов не превышает 0,03 пФ.

Высокочастотный пентод имеет весьма высокий коэффициент усиления μ (доходящий до нескольких тысяч) и большое внутреннее сопротивление R_i (доходящее до сотен тысяч и миллионов Ом). Анодные ха-

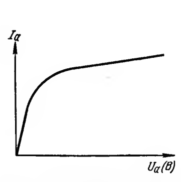


Рис. 10. Анодная характеристика пентода

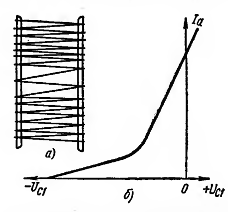


Рис. 11. Пентод с переменной крутизной: *а* — конструкция сетки, *б* — анодно-сеточная характеристика

рактеристики пентода (рис. 10) напоминают соответствующие характеристики лучевого тетрода. Некоторые типы высокочастотных пентодов: 6Ж1П, 6Ж3П, 6Ж5П, 6Ж20П, 6Ж21П.

В современных приемниках осуществляется автоматическая регулировка усиления — увеличение коэффициента усиления при приеме слабых сигналов и уменьшение его при приеме сильных сигналов. С этой целью применяют *пентоды с удлиненной характеристикой (с переменной крутизной)*. Такая характеристика получается, если спираль управляющей сетки намотана с переменным шагом (рис. 11, *а*). Тогда при небольшом отрицательном напряжении на управляющей сетке она пропускает электроны со всей поверхности катода и крутизна характеристики большая. При увеличении отрицательного сеточного напряжения сетка перестает пропускать электроны с той части катода, где сетка гуще, и электроны пролетают лишь там, где сетка реже. Эффективная поверхность анода и крутизна характеристики пентода уменьшаются. Анодно-сеточная характеристика пентода с переменной крутизной изображена на рис. 11,*б*. К этому типу ламп относят пентоды 6К1П, 6К4П, 6Б2П.

Низкочастотные пентоды предназначены для оконечных усилителей. По конструкции такие пентоды проще высокочастотных. Экра-

ннрующую сетку делают не такой густой, вследствне этого уменьшается коэффнцнент усиления н внутреииее сопротивлеине. Коэффициент усилення нмеет величину от 150 до 600, а внутреннее сопротнвление— от 20 до 100 кОм. Рабочне поверхностн электродов в ннзкочастотных пентодах значнтельно больше, чем в высокочастотиых. Это ведет к увелнчению крутнзны характернстикн S до 9—12 мА/В. К ннзкочастотиым пентодам отиосят лампы: 6П14П, 6П15П, 6П18П.

§ 10. КОМБИНИРОВАННЫЕ И МНОГОСЕТОЧНЫЕ ЛАМПЫ

Комбиинроваииые лампы, в которых сочетаются две, три н четыре лампы в одиом баллоне, нмеют большое распространеиие. Широко нспользуют двойиой кенотрои, прнменяемый для работы в двухполупериодиых схемах выпрямления. Детекториые днοды также выполияют двойнымн. Одни нз иих используют для детектирования, второй — в схеме автоматнческой регулировкн усиления. Двойиые триоды примеияют в двухтактных схемах для усилеиия иизкой частоты, в релаксациониых генераторах, электрониых реле и т. д. Оии могут иметь как раздельиые, так н общие катоды. В двойиых днод-триоде н днод-пеитоде диоды служат для детектировання, а тнод нлн пентод — для уснления колебаиий иизкой частоты.

Достоииствамн комбиинрованиых ламп являются экономня массы н габарнтов, упрощение монтажа и экономия питаиия. Однако комбннрованные лампы обычио сложиы в изготовлеиии, н нх стоимость зачастую превышает стоимость двух отдельных ламп.

Миогосеточиые лампы также шнроко примеияют. Особеииостью этих ламп является наличие двух управляющнх сеток, на которые подаются перемеиные иапряжения различиой частоты.

Гексод — шестиэлектродиая лампа. Сетки *1* и *3* — управляющие, *2* н *4* — экранирующне. Сетка *2* служнт для устранеиия паразнтиой связи между управляющнми сеткамн, сетка *4* выполняет функцию обычиой экраиирующей сетки тетрода. Широко прнмеияют трнодгексоды, напрнмер лампу 6И1П. Гептод — семнэлектродная лампа. Примером таких ламп являются гептоды-преобразователи 1А1П и 6А2П, в которых изиачеиие сеток *1—4* такое же, как н в гексоде, а сетка *5* выполняет фуикцию защитной.

§ 11. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ЛАМПЫ

Генераторные лампы не отлнчаются от приемно-уснлнтельных по прннципу действия, но существенно отличаются по конструкции и габаритам. Это объясняется особеииостью работы генераторных ламп н предъявляемых к ннм требоваиий. Важиейшнм требованием является отдача большей мощностн прн возможио большем к. п. д. схемы. Генераториые лампы различают по отдаваемой мощиости, назначению и наибольшей рабочей частоте.

По величнне мощностн геиераторные лампы можно разделнть на следующне группы: лампы малой мощностн, у которых допустнмая мощность, рассеиваемая на аноде, не более 50 Вт, лампы средней мощ-

ности — допустимая мощность рассеивания не более 1000 Вт; лампы большой мощности — допустимая мощность рассеивания превышает 1000 Вт (до 2000 Вт и более).

По назначению и наибольшей рабочей частоте генераторные лампы можно разделить на следующие группы: низкочастотные, работающие в схемах усиления низкой частоты; высокочастотные для работы в схемах генераторов и усилителей радиочастот (до 30 мГц); сверхвысокочастотные лампы, в которых много внимания уделяется уменьшению междуэлектродных емкостей, индуктивностей вводов и уменьшению различных потерь.

По количеству электродов генераторные лампы делятся на триоды, тетроды и пентоды.

Тип генераторной лампы и особенности ее конструкции определяются назначением, величиной мощности, рассеиваемой на аноде, диапазоном рабочих частот. Усилитель достигает наибольшего к. п. д. в режиме с отсечкой тока (режим класса В или С). Генераторные лампы делают с густыми управляющими сетками, что значительно увеличивает их коэффициент усиления. Такие лампы обладают правыми характеристиками. Это дает возможность генераторной лампе работать в режиме отсечки тока с высоким к. п. д. при небольшом смещении на сетке.

Генераторные лампы малой мощности при работе в генераторах и усилителях мощности высокой частоты являются пентодами или лучевыми тетродами. По сравнению с триодами они имеют возможность получения бо́льшего усиления мощности на один каскад, их частотная характеристика лишена недостатков, присущих триодной схеме.

Генераторные лампы средней мощности также являются пентодами и тетродами. Дальнейшее увеличение мощности ограничивается ростом мощности, рассеиваемой на экранирующей сетке.

Генераторные лампы большой мощности в большинстве случаев являются триодами. Такие триоды обладают правыми характеристиками и большой проходной емкостью.

Модуляторные лампы предназначены для изменения амплитуды высокочастотных колебаний в соответствии с амплитудой колебаний звуковой частоты. Это обычно триоды, имеющие левые характеристики и работающие без отсечки тока (класс А).

Импульсные лампы применяют для управления работой импульсных генераторов. В исходном состоянии лампа заперта отрицательным напряжением на управляющей сетке. Лампа отпирается при подаче на сетку импульсов положительной полярности. В анодной цепи проходят кратковременные импульсы постоянного тока, а на генератор подается импульс напряжения, обеспечивающий в нем режим возбуждения.

В маломощных схемах применяют обычные приемно-усилительные лампы (триоды, тетроды и пентоды) с оксидным катодом, обеспечивающим получение большого тока и большой выходной мощности.

В маломощных и средней мощности генераторных лампах и большинстве импульсных ламп применяют оксидный катод. В лампах большой мощности используют торированные, карбидированные или чисто вольфрамовые катоды. Сетки ламп делают из молибденовой или вольфрамовой проволоки. Аноды ламп выполняют из тугоплавких материалов (никель, тантал, молибден, графит). Охлаждение анодов происходит в основном за счет лучеиспускания.

В лампах большой мощности применяют принудительное охлаждение — водяное или воздушное. Впервые лампы с водяным охлаждением были разработаны М. А. Бонч-Бруевичем в 1920 году. В этих лампах анод помещается в специальный кожух, через который насосами прогоняется дистиллированная вода. Лампы с воздушным охлаждением были предложены П. А. Остряковым в 1932—1933 годах. Для увеличения поверхности охлаждения к аноду присоединяют радиатор, состоящий из параллельно расположенных ребер. Через радиатор протекает поток воздуха, усиливающий теплоотвод от анода.

Чтобы обеспечить длительную и безаварийную работу ламп, нужно соблюдать основные правила их эксплуатации. Принудительное охлаждение анода и стеклянного баллона включают до включения напряжения накала и выключают через 10 мин после выключения напряжения накала. Во избежание большого пускового тока накал лампы нельзя включать сразу полностью, так как холодный катод имеет малое сопротивление. Поэтому применяют плавное или ступенчатое включение накала. Вначале включают накал и только после этого подают постоянное напряжение на другие электроды.

После длительного хранения или бездействия вакуум лампы ухудшается. Поэтому, перед включением в действующую схему лампу тренируют путем подачи нормального напряжения на катод и управляющую сетку и постепенного увеличения напряжения на аноде.

Некоторые типы генераторных ламп: ГУ-30А, ГУ-37Б, ГУ-47А, ГУ-47Б, ГК-5А.

§ 12. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Развитие новых отраслей радиотехники (радиорелейной связи, радиолокации и др.) связано с освоением сверхвысоких частот (СВЧ); метровых волн или УКВ (30—300 МГц) и диапазонов СВЧ — дециметровых волн (300—3000 МГц), сантиметровых волн (3000—30 000 МГц) и миллиметровых волн (более 30 000 МГц).

При использовании обычных ламп на СВЧ их свойства значительно изменяются. Одной из причин является то, что время пролета электронов $\tau_{эл}$ между электродами становится соизмеримым с периодом T переменного напряжения на сетке. В связи с этим электронный поток не успевает следовать за изменениями напряжений между электродами. Это приводит к появлению фазового сдвига между токами и напряжениями и является причиной значительных сеточных токов.

Для уяснения влияния времени пролета электронов на работу лампы на СВЧ рассмотрим схему, показанную на рис. 12, *а*. Отрицательный заряд *1* движется от катода *К* в сторону сетки *С*. По законам электроста-

тической индукции на сетке возникает положительный заряд. Поэтому в цепи сетки появляется наведенный ток i_1, направленный от катода к сетке *C*. Электроны (заряд *2*), пролетев сетку, движутся далее к аноду *A* и создают в сеточной цепи ток i_2, направленный от сетки к катоду. Как видно из рисунка, токи i_1 и i_2 в цепи сетки противоположно направлены.

Так как количество и скорость электронов, приближающихся к сетке, равны количеству и скорости электронов, удаляющихся от нее, суммарный наведенный ток в цепи сетки i_c равен нулю.

Включим в цепь сетки переменное напряжение, период колебания которого равен *T*. Когда период колебания намного больше времени

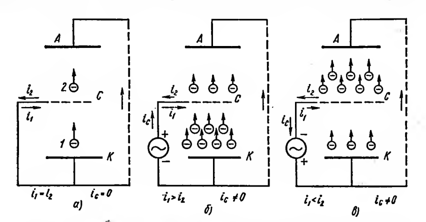


Рис. 12. Схемы образования наведенного тока в цепи сетки триода:
а — ток сетки равен нулю, *б* — ток сетки направлен от катода к сетке, *в* — ток направлен от сетки к катоду

пролета электронов, напряжение на сетке за время $\tau_{эл}$ почти не изменится и число электронов, приближающихся к сетке, практически равно числу электронов, удаляющихся от нее в сторону анода; токи i_1 и i_2 равны и суммарный наведенный ток в цепи сетки, как и в предыдущем случае, равен нулю. Когда *T* соизмерим с $\tau_{эл}$, взаимная компенсация токов в цепи сетки нарушается и суммарный наведенный ток в цепи сетки не равен нулю.

Так, в положительный полупериод сеточного напряжения (рис. 12, *б*) число и скорость электронов, находящихся в пространстве между катодом и сеткой, максимальны. Число и скорость электронов, находящихся между сеткой и анодом, значительно меньше, так как они проходили участок катод — сетка во время предыдущего отрицательного полупериода напряжения на сетке. Ток $i_1 > i_2$, результирующий наведенный ток i_c не равен нулю и направлен от катода к сетке.

В отрицательный полупериод сеточного напряжения (рис. 12, *в*) электроны, подлетающие к сетке, затормаживаются и их число поэтому уменьшается; число и скорость электронов, находящихся между сеткой и анодом, максимальны, так как они проходили участок катод —

сетка во время предыдущего положительного полупериода напряжения на сетке. Ток $i_2 > i_1$, результирующий наведенный ток i_c не равен нулю и направлен от сетки к катоду.

Направления тока i_c в положительный и отрицательный полупериоды напряжения показаны на рис. 12, *б* и *в*. Как видно из рисунков, сеточный ток i_c совпадает по фазе с переменным сеточным напряжением. Это указывает на то, что сеточная цепь лампы потребляет мощность от источника сеточного напряжения. С ростом частоты увеличивается мощность, потребляемая от источника усиливаемых колебаний. Появление сеточного тока равносильно появлению проводимости в цепи сетки и уменьшению входного сопротивления лампы.

На свойства лампы для СВЧ также влияют ее собственные емкости и индуктивности. Междуэлектродные емкости, включенные параллельно внешним контурам, увеличивают их емкость и уменьшают их резонансное сопротивление. Но уменьшение резонансного сопротивления контура приводит к уменьшению усиления каскада.

Индуктивности вводов вместе с междуэлектродными емкостями образуют последовательные колебательные контуры, включенные параллельно входному и выходному контурам схемы. Этим они ограничивают максимальную частоту, на которой может работать лампа. На сверхвысоких частотах сказываются также диэлектрические потери в изоляторах, через которые проходят выводы лампы.

Как видно из вышеизложенного, физические процессы в лампе зависят от соотношения времени пролета электронов $\tau_{эл}$ и периода переменного напряжения T. Для оценки влияния $\tau_{эл}$ обычно пользуются углом пролета электронов Θ:

$$\Theta = 2\pi \frac{\tau_{эл}}{T} = 2\pi f \tau_{эл} = \omega\tau_{эл}. \quad (11)$$

Угол пролета есть измеренное в угловых единицах изменение фазы переменного напряжения за время пролета электронов от одного электрода к другому. Практически $\tau_{эл}$ в электронных лампах может иметь величину от 10^{-8} до 10^{-10} с.

Пусть $\tau_{эл} = 10^{-9}$ с, а частота переменного напряжения $f = 250$ МГц. Так как $T = \frac{1}{f} = 4 \cdot 10^{-9}$ с, то

$$\Theta = 2\pi \frac{10^{-9}}{4 \cdot 10^{-9}} = \frac{\pi}{2} \text{ [рад] или } 90°.$$

Влиянием времени пролета электронов на работу лампы можно пренебречь, если оно меньше 1/20 периода переменного напряжения. Это соответствует величине угла пролета $\Theta < \frac{1}{10}\pi$. При больших углах Θ время пролета заметно влияет на работу лампы.

Описанные свойства электронных ламп, используемых на сверхвысоких частотах, определяют особенности их конструкции. В этих лампах максимально снижены междуэлектродные емкости, индуктивности вводов и междуэлектродные расстояния для уменьшения угла пролета,

применены высококачественные изоляционные материалы для уменьшения диэлектрических потерь.

На метровых волнах используют пальчиковые и сверхминиатюрные лампы, в которых снижение междуэлектродных емкостей и индуктивностей вводов достигается уменьшением размеров электродов и длины вводов при одновременном удалении их друг от друга. Пальчиковые лампы являются цельностеклянными; выводные штырьки в них укреплены непосредственно в дне баллона. Сверхминиатюрные лампы также цельностеклянные, выводы у них выполнены в виде мягких проволочек.

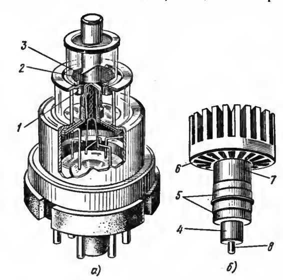


Рис. 13. Электронные лампы для СВЧ:
а — маячковая, *б* — металлокерамическая; *1* — катод, *2* — сетка, *3* — анод, *4* — вывод нити накала и катода, *5* — выводы сетки, *6* — радиатор анода, *7* — изолятор, *8* — вывод нити накала

В диапазонах дециметровых и сантиметровых волн применяют маячковые (рис. 13, *а*) и металлокерамические (рис. 13, *б*) триоды. Они имеют плоскую конструкцию электродов с дисковыми впаями. Анод *3* представляет собой цилиндрический стержень, нижний конец которого обращен к катоду и служит его рабочей поверхностью. Катод *1* также выполнен в виде цилиндра, обращенного своим основанием к аноду. Между катодом и анодом располагается сетка *2*, имеющая вид плоской решетки. Выводы электродов выполнены в виде металлических дисков и цилиндров разного диаметра.

В маячковом триоде выводы спаяны со стеклянным корпусом, а в металлокерамическом — с керамическим корпусом. На эти выводы надевают коаксиальные линии. Маячковые лампы используют в схемах маломощных передатчиков и усилителей, металлокерамические — в схемах более мощных передатчиков. Для лучшего охлаждения на анод

лампы навинчивают ребристый радиатор *б*, который обдувается вентилятором.

В коротковолновой части сантиметрового диапазона и на более коротких волнах применяют электронные приборы, принцип действия которых отличается от принципа действия рассмотренных ламп. Это клистроны, магнетроны, лампы с бегущей волной (ЛБВ) и лампы с обратной волной (ЛОВ). Они рассматриваются в гл. X.

§ 13. ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электроннолучевые трубки широко используют в различных отраслях радиотехники (осциллографии, радиолокации и телевидении). В узкой части трубки размещается катод *К* (рис. 14), система фокусировки электронного потока и отклоняющая система. На внутренней поверхности противоположной стенки трубки расположен экран *Э*, на который нанесен слой люминофора.

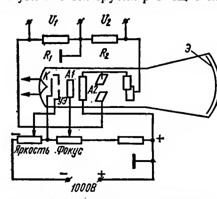


Рис. 14. Устройство и схема включения электроннолучевой трубки

Катод — оксидный, косвенного накала, имеет форму цилиндра, на дно которого нанесен оксидный слой. Катод помещают внутри управляющего электрода *УЭ* цилиндрической формы. В дне цилиндра имеется отверстие (диафрагма). Изменяя отрицательный потенциал управляющего электрода относительно катода, можно регулировать величину электронного потока и этим менять яркость светового пятна на экране.

За управляющим электродом расположены два анода *А1* и *А2* также цилиндрической формы. Внутри анодов имеются перегородки с небольшими отверстиями. На первый анод *А1* подается постоянное напряжение 300—1000 В, на второй анод *А2* — 800—5000 В относительно катода. Ускоряющее поле этих анодов обеспечивает движение электронов в сторону экрана и одновременно фокусирует электронный поток в узкий пучок (луч). Фокусирование осуществляется с помощью электрического или магнитного поля.

Электростатическое фокусирование луча происходит в электрическом поле между двумя цилиндрическими анодами *А1* и *А2* (рис. 15, *а*). На электрон *е*, влетающий в электрическое поле (точка *А*) под углом α (рис. 15, *б*), действует радиальная составляющая напряженности поля E_2, которая отклоняет траекторию электрона к оси вниз. В точке *В* радиальная составляющая E_2' отклоняет траекторию электрона к оси. Можно подобрать скорость электронов и конфигурацию поля так, чтобы электроны сошлись на экране в одну точку.

Магнитное фокусирование луча осуществляется фокусирующей катушкой, надеваемой на горловину трубки. Пусть в точку A (рис. 16) влетел электрон со скоростью v под углом α. В этой точке напряженность магнитного поля H имеет продольную $H_{пр}$ и поперечную $H_п$ составляющие. Сила, с которой действует $H_п$, согласно правилу левой

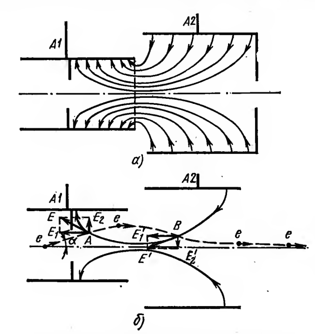


Рис. 15. Электрическое поле между двумя анодами (а) и траектория электрона в электрическом поле (б)

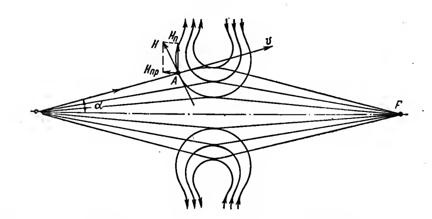


Рис. 16. Траектория электрона в магнитном поле

руки, направлена за плоскость чертежа. Под действием этой силы электрон приобретает составляющую скорости $v_п$, также направленную за плоскость чертежа. Сила F, с которой действует $H_{пр}$ на составляющую скорости электрона $v_п$, направлена вниз и прижимает его к оси. Скорость электронов и конфигурацию поля подбирают так, чтобы любой электрон пересекал ось трубки в одной точке (в центре экрана).

Для отклонения сфокусированного луча и перемещения его на экране применяют, так же как и для фокусировки, электрические и магнитные поля.

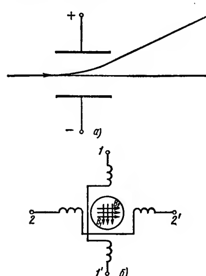


Рис. 17. Системы отклонения электронного луча:
а — электростатическая, *б* — магнитная; 1, 1', 2, 2' — отклоняющие катушки

Электростатическая система отклонения луча состоит из двух пар горизонтально и вертикально отклоняющих пластин. Если к двум пластинам (рис. 17, *а*) приложить напряжение, то электрон отклонится в сторону положительно заряженной пластины. Наличие двух пар взаимно перпендикулярных пластин дает возможность отклонять электронный луч в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Магнитное отклонение луча осуществляется двумя парами катушек, расположенных под прямым углом друг к другу на баллоне трубки (рис. 17, *б*). Как мы уже выяснили, электрон, вступивший в магнитное поле со скоростью v_0, направленной перпендикулярно силовым линиям поля, движется под действием силы F по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной силовым линиям. Вертикально расположенные катушки своим магнитным полем вызывают перемещение электронного луча по горизонтали, а горизонтально расположенные — по вертикали.

Отклонение электронного луча тем больше, чем больше напряженность магнитного поля H и меньше напряжение $U_а$, ускоряющее движение электронов. Отклоняющие катушки *1*, *1'* и *2*, *2'* располагают на горловине баллона трубки. Чтобы сосредоточить магнитный поток, иногда применяют катушки с магнитными сердечниками и полюсными наконечниками, но это увеличивает массу. Кроме того, с увеличением частоты отклоняющего напряжения значительно возрастают потери в стали. Поэтому во многих трубках применяют катушки без сердечников. Экран представляет собой полупрозрачный слой люминофора.

Основную группу электроннолучевых трубок составляют осциллографические трубки. Они служат для исследования быстрых изменений во времени тока и напряжения. Некоторые типы этих трубок: 13ЛО36В, 13ЛО101М, 18ЛО47А.

§ 14. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Физические процессы в ионных приборах. В рассмотренных нами приборах носителями электричества являются электроны, поэтому такие приборы называют *электронными*. Но существует обширная группа приборов, в которых носителями электричества являются не только электроны, но и заряженные частицы газа — ионы. Такие приборы называют *ионными* или *газоразрядными*.

Ионный прибор состоит из баллона, наполненного инертным газом (аргоном, неоном, ксеноном, криптоном) или парами ртути при пониженном давлении (10^{-2} — 10^{-1} мм рт. ст.). Внутри баллона установлены два электрода — катод K и анод A (рис. 18, *а*), причем катод

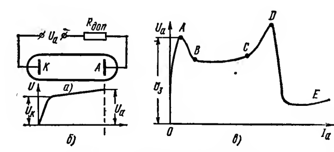


Рис. 18. Газоразрядный прибор:
а — схема включения, *б* — распределение напряжения между электродами, *в* — вольт-амперная характеристика

может быть ненакаливаемый (холодный) или накаливаемый. По виду происходящего в приборе разряда различают ионные приборы с самостоятельным и несамостоятельным разрядом.

Самостоятельный разряд происходит в приборе с холодным катодом. Вследствие ионизирующего действия космических лучей и радиоактивного излучения внутри баллона всегда имеется некоторое количество заряженных частиц — электронов и ионов. Под действием приложенного напряжения $U_а$ эти заряды начинают двигаться — ионы к катоду, а электроны к аноду. При определенном значении $U_а$ скорость движения электрона будет достаточной, чтобы, сталкиваясь с атомом газа, выбить из нее электроны, т. е. ионизировать его. Такая ионизация называется ударной.

Выбитые электроны движутся к аноду и, сталкиваясь с атомами газа, ионизируют их. Количество носителей электричества (электронов и ионов) возрастает, и ток, протекающей через прибор, увеличивается. Образующиеся при ионизации положительные ионы движутся к катоду и, если их энергия достаточна, выбивают из катода вторичные электроны. Одновременно с ионизацией в приборе происходит рекомбинация электронов и ионов. При этом выделяется энергия в виде квантов света определенной частоты и газ начинает интенсивно светиться.

На рис. 18, *б* показано распределение напряжения между электродами в газоразрядной трубке при самостоятельном разряде. Как видно, напряжение распределяется по оси x неравномерно. Основное падение напряжения $U_к$ сосредоточено в непосредственной близости от катода (катодное падение). Объясняется это тем, что положительные ионы образуют вокруг катода ионный объемный заряд с высоким положительным потенциалом. Катодное падение напряжения равно 70—150 В. Остальное междуэлектродное пространство заполнено сильно ионизированным газом, в котором концентрации электронов и положительных ионов приблизительно одинаковы. Этот газ называется электронно-ионной плазмой. Падение напряжения в плазме невелико.

Для лучшего уяснения процессов, происходящих в ионном приборе при самостоятельном разряде, рассмотрим его вольт-амперную характеристику (рис. 18, *в*). На участке OA по мере увеличения напряжения $U_а$ ток $I_а$ возрастает незначительно, процесс ионизации протекает неинтенсивно, поэтому свечение газа отсутствует. В приборе имеет место тихий, или темновой, разряд.

При некотором напряжении $U_з$ (точка A), называемом напряжением зажигания, возникает ионизация газа и прибор зажигается. После зажигания напряжение несколько уменьшается, а ток увеличивается (участок AB), так как с усилением процесса ионизации уменьшается сопротивление прибора. При этом происходит перераспределение напряжения между прибором и сопротивлением $R_{доп}$. Участок AB называется порогом зажигания.

После зажигания в приборе наступает режим тлеющего разряда, при котором разряд поддерживается за счет эмиссии электронов с катода под ударами положительных ионов. Эти электроны, двигаясь к аноду, вызывают ионизацию нейтральных атомов и поддерживают разряд в газе. При дальнейшем увеличении напряжения ток быстро возрастает вследствие расширения области ионизации. Этому соответствует участок BC характеристики. В этом режиме величина разрядного тока пропорциональна светящейся поверхности катода.

Когда бо́льшая часть газа в приборе ионизируется и тлеющий разряд охватывает всю поверхность катода, дальнейшее увеличение тока требует повышения напряжения (участок CD). Этот режим называется аномальным тлеющим разрядом. При последующем увеличении тока тлеющий разряд перерастает в дуговой, характеризующийся значительным уменьшением напряжения на зажимах трубки и резким ростом тока (участок DE).

Дуговой разряд начинается вследствие того, что при большой плотности тока и интенсивных процессах ионизации положительные ионы подходят к катоду на расстояние $d = 10^{-5} - 10^{-6}$ см; при катодном падении $U_к \approx 10$ В напряженность электрического поля $E_к = \frac{U_к}{d} = 10^6 - 10^7$ В/см. При этом возникает автоэлектронная эмиссия, т. е. вырывание электрическим полем электронов из холодного катода. Дуговой разряд с холодным катодом называется автоэлектронной дугой.

К приборам, работающим в режиме тлеющего разряда с холодным катодом, относят газовые стабилизаторы напряжения (стабилитроны) и неоновые лампы.

Газовые стабилитроны — приборы тлеющего разряда, предназначенные для получения неизменных напряжений постоянного тока. Они находят широкое применение в устройствах автоматики. Это двухэлектродные лампы, наполненные инертным газом. Анод выполнен в виде штырька диаметром 1—1,5 мм и окружен цилиндрическим катодом из никеля или стали. Внутренняя поверхность катода покрыта активным слоем из материала (например, бария), имеющего малую работу выхода. К катоду с внутренней стороны приварена никелевая проволочка. Расстояние между концами этой проволочки и анодом в результате этого уменьшено и облегчено зажигание разряда в приборе. Некоторые стабилитроны, например СГ1П имеют пальчиковое оформление. Как было показано, при нормальном тлеющем разряде (участок *BC* характеристики, рис. 18, *в*) ток, текущий через прибор, резко изменяется при незначительном изменении напряжения на нем. Эта особенность тлеющего разряда используется в стабилитронах.

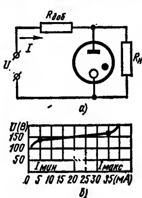


Рис. 19. Стабилитрон:
а — схема включения, *б* — характеристика

Схема включения стабилитрона изображена на рис. 19, *а*. Сопротивление $R_{доб}$ подбирают таким, чтобы при номинальном напряжении источника $U_{ном}$ ток соответствовал примерно средней точке рабочего участка характеристики стабилитрона. Напряжение на зажимах стабилитрона и нагрузки $R_н$ равно

$$U_R = U - IR_{доб},$$

где ток I равен сумме токов, проходящих через нагрузку и стабилитрон.

Предположим, что напряжение источника U немного увеличилось. Это вызовет увеличение тока I, увеличение падения напряжения на сопротивлении $R_{доп}$, а напряжение на стабилитроне и нагрузке $R_н$ остается неизменным. Допустимые пределы изменения тока ($I_{мин}$ и $I_{макс}$) и величину стабилизированного напряжения определяют по характеристике стабилитрона (рис. 19, *б*).

Неоновая лампа является газосветной лампой с тлеющим разрядом. Два ее электрода имеют форму дисков, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Если подвести достаточное напряжение, в лампе возникает тлеющий разряд и образуется свечение оранжево-красного цвета. С увеличением приложенного напряжения свечение усиливается. Во избежание дугового разряда последовательно с лампой включают добавочное сопротивление. Неоновую лампу применяют в качестве индикатора настройки того или

ного контура в резонанс, индикатора высокого анодного напряжения и для других целей.

Несамостоятельный разряд. Разряд этого вида происходит в приборах с накаливаемым катодом. К приборам с несамостоятельным разрядом относят газотроны и тиратроны.

Газотроны — это двухэлектродные лампы с накаливаемым катодом, наполненные парами ртути или инертным газом. Катод изготовляют из никелевой ленты, свернутой в спираль и покрытой оксидным слоем. Анод в газотронах малой мощности—никелевый и имеет форму диска. В более мощных газотронах анод изготовляют из графита; он имеет форму чашки, окружающей катод. Вывод анода делают сверху, выводы накала — вниз на цоколь.

Благодаря электронной эмиссии при сравнительно небольшом напряжении на аноде возникает дуговой разряд и газотрон зажигается. Образовавшиеся в лампе положительные ионы движутся к катоду и создают около него положительный заряд, который нейтрализует тормозящее действие отрицательного объемного заряда. По этой причине в газотроне при гораздо меньшем анодном напряжении проходит такой же ток, как и в кенотроне. Из-за малого анодного напряжения мощность, рассеиваемая на аноде газотрона, уменьшается и увеличивается к. п. д. Поэтому наибольшее применение получили газотроны в мощных высоковольтных выпрямителях, для которых к.п.д. имеет большое значение.

Но газотроны имеют недостатки. При отрицательном напряжении на аноде к нему направляются положительные ионы. Если это напряжение велико, скорость ионов, бомбардирующих анод, может быть достаточной для выбивания из него вторичных электронов. Двигаясь к катоду, электроны ионизируют газ. Этот может вызвать обратное зажигание газотрона и резкое увеличение обратного тока, который может достигнуть значения прямого тока, газотрон потеряет свойство выпрямителя. Вследствие этого важнейшим параметром газотрона является допустимое значение обратного напряжения $U_{обр}$.

Рабочим участком вольт-амперной характеристики газотрона (см. рис. 18, *в*) является ее пологая часть (участок *BC*); участок *CD* — нерабочий, так как при увеличении напряжения на аноде возрастает скорость ионов, бомбардирующих катод. Это приводит к его разрушению. Поэтому важным параметром газотрона является также наибольшая амплитуда анодного тока $I_{а. макс}$.

Газотроны, наполненные парами ртути, применяют в высоковольтных выпрямителях, предназначенных для питания радиопередатчиков и мощных усилителей. Газотроны, наполненные инертным газом, выполняют двуханодными. Их используют в схемах двухполупериодных выпрямителей низкого напряжения.

В условных обозначениях газотронов первой является буква Г, вторая буква показывает наполнение (Р — парами ртути, Г — инертным газом). Первая цифра обозначает тип прибора, вторая — наибольший выпрямленный ток в амперах, третья — наибольшее допустимое обратное напряжение в киловольтах. Некоторые типы применяемых газотронов: ВГ-129, ГГ1-0,5/5; ГР1-0,25/1,5.

Тиратроны — это трехэлектродные лампы с накаленным катодом, наполненные парами ртути или каким-либо инертным газом. По своим свойствам тиратрон значительно отличается от вакуумного триода. Чтобы выяснить особенность тиратрона, рассмотрим его анодно-сеточную характеристику — зависимость анодного тока от сеточного напряжения при постоянном напряжении на аноде: $i_a = \varphi(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ (рис. 20, *а*).

При большом отрицательном напряжении тиратрон заперт и $i_a = 0$; затем при постепенном уменьшении отрицательного напряжения на сетке анодный ток медленно возрастает. При некотором напряжении на сетке, называемом напряжением зажигания, скорость электронов увеличивается настолько, что начинается ионизация. Тиратрон зажигается, ток резко растет.

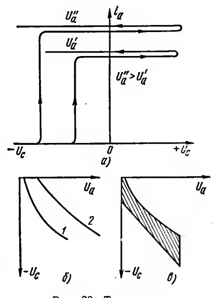


Рис. 20. Тиратрон:
а — анодно-сеточные характеристики, *б* — пусковые характеристики, *в* — пусковая область

Положительные ионы устремляются к катоду и сетке. У катода они нейтрализуют отрицательный объемный заряд, внутреннее сопротивление тиратрона становится небольшим и величина анодного напряжения уменьшается. Ионы, устремляющиеся к сетке, нейтрализуют ее отрицательный потенциал. Вследствие этого сетка теряет свое управляющее действие. Поэтому изменение сеточного напряжения не вызывает изменения анодного тока (горизонтальная часть характеристики). Погасить тиратрон можно лишь путем уменьшения анодного напряжения.

При большем анодном напряжении ($U''_a > U'_a$) зажигание тиратрона произойдет при более отрицательном напряжении на сетке, т. е. чем больше напряжение на аноде, тем при более отрицательном напряжении на сетке происходит зажигание тиратрона. Эта зависимость выражается пусковой характеристикой тиратрона (рис. 20,*б*). Кривая *1* является пусковой характеристикой для тиратрона с редкой сеткой, кривая *2* — для тиратрона с густой сеткой.

Напряжение зажигания зависит не только от величины анодного напряжения, но и от температуры, сопротивления нагрузки, напряжения накала и др. По этой причине одному и тому же анодному напряжению соответствует множество различных значений напряжения на сетке, при котором происходит зажигание тиратрона. Поэтому в справочниках приводят пусковую область тиратрона (рис. 20,*в*).

Тиратроны применяют для регулировки величины выпрямленного напряжения в быстродействующих реле и т. д.

§ 15. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

К полупроводникам относят обширную группу твердых веществ, имеющих главным образом кристаллическую структуру и обладающих некоторыми особенностями механизма электропроводности. Одной из этих особенностей является увеличение электропроводности при повышении температуры. Полупроводниками являются химические соединения — окислы металлов (оксиды), сернистые соединения (сульфиды), соединения с селеном (селениды), а также химические элементы: германий, кремний, теллур, селен и др. Сплавы некоторых металлов также обладают свойствами полупроводников.

В металлах прохождение тока обусловлено перемещением электронов под действием электрического поля. Металлы обладают хорошей

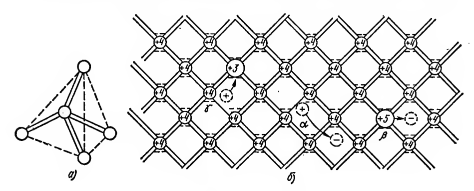


Рис. 21. Германий:
а — связь атома с четырьмя соседними атомами, *б* — кристаллическая решетка

электропроводностью, так как в них валентные электроны легко отделяются от атомов и создают ток проводимости. В диэлектриках валентные электроны прочно связаны с атомами, поэтому они не могут перемещаться и создавать ток проводимости. В чистом полупроводнике при нормальной температуре валентные электроны сравнительно прочно связаны с атомами; такой полупроводник по своим свойствам близок к диэлектрику. При повышении температуры усиливается тепловое движение атомов и электронов, возрастает количество валентных электронов, освобождающихся от атомов, т. е. проводимость полупроводника с увеличением температуры растет.

В таких полупроводниках, как германий, кремний, атомы имеют по четыре электрона на внешней орбите (по четыре валентных электрона). Каждый атом связывается своими валентными электронами с четырьмя соседними атомами, расположенными по вершинам правильного тетраэдра (рис. 21,*а*). На рис. 21, *б* показано плоскостное изображение кристаллической решетки германия. Как видно из рисунка, связь между соседними атомами осуществляется восемью электронами: четырьмя собственными и по одному от каждого атома. Когда все ва-

лентные электроны связаны, материал является изолятором. Но если нарушить каким-либо образом силы связи, например путем повышения температуры, то из решетки может быть выбит один электрон α и останется свободное место, называемое дыркой.

Если к кристаллу приложить внешнее напряжение, выбитый электрон будет двигаться под действием электрического поля и образуется ток. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов, называется *электронной* или *проводимостью типа n* (от латинского слова negative — отрицательный). Наличие дырок в кристаллической решетке приводит к другой возможности переноса электрических зарядов.

Под действием электрического поля связанный электрон соседнего атома может переместиться и занять дырку. Но восстановление одной связи приводит к нарушению другой и появлению новой дырки. Следовательно, под действием электрического поля происходит движение дырок в направлении, противоположном движению электронов. Проводимость, обусловленная движением дырок, называется *дырочной* или *проводимостью типа p* (от латинского слова positive — положительный).

В идеальном (чистом) полупроводнике при разрывах валентных связей одновременно возникают в равных количествах электроны и дырки; такой полупроводник обладает электронной и дырочной проводимостями. Проводимость, наблюдаемая в идеальном полупроводнике, называется *собственной*.

Если ввести в полупроводник примеси других элементов, можно значительно увеличить его электропроводимость. В зависимости от вида примеси эта проводимость будет иметь различный характер. Примеси, вызывающие преобладание электронов и создающие в основном электронную проводимость, называются *донорными*. Для германия такими примесями являются пятивалентные элементы — сурьма, мышьяк и др.

Пятый валентный электрон β атома примеси, слабо связанный с соседними атомами, может даже при комнатной температуре оторваться от атома и участвовать в проводимости. Полупроводник с электронной проводимостью называется полупроводником типа *n*.

Примеси, вызывающие преобладание дырок и создающие в основном дырочную проводимость, называются *акцепторными*. Для германия такими примесями являются трехвалентные элементы — индий или галлий. Атом индия или галлия имеет только три валентных электрона, поэтому при замещении одного атома германия атомом примеси в решетке окажутся заполненными связи только трех соседних атомов, а одна связь остается незаполненной, т. е. образуется дырка. Дырка может быть заполнена электроном γ соседнего атома, в результате чего возникает новая дырка. Полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником типа *p*.

Электроны в полупроводнике типа *n* и дырки в полупроводнике типа *p* называются *основными носителями заряда*; небольшое количество свободных электронов в полупроводнике типа *p* и дырок в полупроводнике типа *n* называются *неосновными носителями заряда*.

Электронно-дырочный переход

Рассмотренные нами полупроводники типов *n* и *p* не могут выпрямлять переменный ток, так как величина тока, проходящего через них, при любой полярности проводимого напряжения не изменяется. Основным элементом полупроводниковых приборов является контакт между двумя полупроводниками с различными типами проводимости. Такой контакт называется *электронно-дырочным переходом* или *p-n-переходом*. При образовании такого контакта начинается переход (диффузия) электронов из полупроводника типа *n* в полупроводник типа *p*

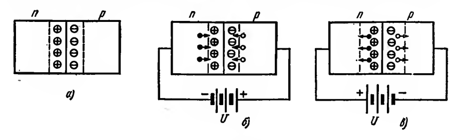


Рис. 22. Электронно-дырочный переход:
а — контакт двух полупроводников типа *n* и типа *p*, *б* — прямое включение внешнего напряжения к *p-n*-переходу, *в* — обратное включение

и обратный переход дырок из полупроводника типа *p* в полупроводник типа *n*.

Вблизи *p-n*-перехода происходит рекомбинация — электроны занимают дырки. Вследствие этого в пограничном слое количество свободных носителей заряда резко уменьшается, что увеличивает сопротивление пограничных слоев *n* и *p* полупроводников. Область повышенного сопротивления называется *запирающим слоем*.

В результате перехода дырок из полупроводника типа *p* в полупроводник типа *n* в полупроводнике типа *p* образуется *слой отрицательных неподвижных зарядов*. Аналогично в полупроводнике типа *n* из-за перехода электронов в полупроводник типа *p* образуется *слой положительных неподвижных зарядов* (рис. 22,*а*). Эти два слоя образуют разность потенциалов запирающего слоя (контактную разность потенциалов) и соответствующее ей электрическое поле $E_к$, препятствующее движению электронов из полупроводника типа *n* в полупроводник типа *p* и обратному движению дырок.

Диффузионное движение электронов и дырок через *p-n*-переход образует диффузионный ток, направление которого совпадает с направлением движения дырок и противоположно направлению электронов. Но поле $E_к$, препятствующее диффузионному движению основных носителей заряда, является ускоряющим для движения неосновных носителей заряда: дырок из полупроводника типа *n* в полупроводник типа *p* и электронов из полупроводника типа *p* в полупроводник типа *n*. Под действием этого поля неосновные носители заряда легко перемещаются через *p-n*-переход, образуя дрейфовый ток, направ-

ленный навстречу диффузионному току. При отсутствии внешнего напряжения диффузионный и дрейфовый токи равны по величине и суммарный ток равен нулю.

Подведем к *p-n*-переходу внешнее напряжение. Вначале подключим минус батареи к полупроводнику типа *n*, а плюс — к полупроводнику типа *p* (рис. 22,*б*). В этом случае полярность приложенного напряжения обратна полярности запорного слоя и контактная разность потенциалов *p-n*-перехода уменьшается.

Кроме того, под действием внешнего напряжения основные носители заряда в полупроводниках типа *n* и *p* приближаются к *p-n*-переходу, заполняют запирающий слой и уменьшают его толщину. Сопротивление запорного слоя уменьшается. Такое включение внешнего напряжения называется *прямым* или *пропускным*. По мере увеличения напряжения сопротивление запорного слоя уменьшается, а ток в цепи возрастает.

Изменим полярность включения батареи. Подключим минус батареи к полупроводнику типа *p*, а плюс — к полупроводнику типа *n* (рис. 22,*в*). В этом случае полярность приложенного напряжения совпадает с полярностью запорного слоя и контактная разность потенциалов *p-n*-перехода увеличивается.

Под действием внешнего напряжения основные носители заряда в обоих полупроводниках удаляются от границы, запирающий слой становится толще и его сопротивление возрастает. Такое включение батареи называется *обратным* или *запорным*. При таком включении ток, образуемый основными носителями заряда, резко уменьшается. Ток во внешней цепи определяется движением неосновных носителей заряда. Этот ток, называемый *обратным* $I_{обр}$, во много сотен и тысяч раз меньше тока, протекающего в цепи при прямом включении батареи прямого тока $I_{пр}$.

Следовательно, контакт двух полупроводников с различными типами проводимости (*p-n*-переход) обладает неодинаковым сопротивлением в различных направлениях или односторонней проводимостью.

На свойства электронно-дырочного перехода оказывают влияние его емкости.

Различают две емкости *p-n*-перехода — зарядную, или барьерную, и диффузионную.

Зарядная или барьерная емкость $C_б$. Электронно-дырочный переход, являющийся двойным слоем разноименных зарядов, ведет себя как плоский конденсатор, диэлектриком которого является запорный слой. Емкость этого конденсатора называется зарядной или барьерной емкостью $C_б$. Величина этой емкости пропорциональна площади *p-n*-перехода *S* и обратно пропорциональна толщине запорного слоя *d*. При подаче обратного напряжения толщина запорного слоя увеличивается, а зарядная емкость уменьшается. Зависимость $C_б$ от приложенного напряжения показана на рис. 23,*а*.

Диффузионная емкость $C_{диф}$. Появление этой емкости объясняется следующим. При прямом подключении внешнего источника через *p-n*-переход происходит инжекция, т. е. внедрение но-

сителей заряда в область, где они являются неосновными. Электроны, попадая в область p, образуют отрицательный объемный заряд — dQ, а дырки, попадая в область n,— положительный объемный заряд dQ.

Если изменять величину напряжения dU, будет изменяться величина инжектированного заряда $dQ_{инж}$. Отношение изменения $dQ_{инж}$

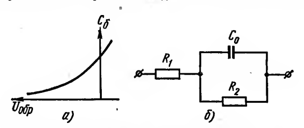


Рис. 23. Емкости p-n-перехода:
а — зависимость зарядной емкости p-n-перехода от приложенного напряжения, *б* — эквивалентная схема p-n-перехода

к изменению dU на p-n-переходе определяется как диффузионная емкость $C_{диф}$:

$$C_{диф} = \frac{dQ_{инж}}{dU}.$$

Общая емкость p-n-перехода C_0 равна сумме емкостей:

$$C_0 = C_б + C_{диф}.$$

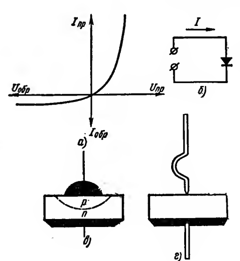


Рис. 24. Полупроводниковые диоды:
а — вольт-амперная характеристика, *б* — схема включения, *в* — устройство плоскостного диода, *г* — устройство точечного диода

Диффузионная емкость существенно сказывается только на низких частотах. На высоких частотах эта емкость мала и емкость p-n-перехода определяется барьерной емкостью: $C_0 \approx C_б$. С учетом емкости C_0 p-n-переход может быть представлен эквивалентной схемой (рис. 23,*б*), в которой R_1 — сопротивление материала кристалла, R_2 — сопротивление запирающего слоя, C_0 — общая емкость p-n-перехода.

Основным элементом полупроводниковых диодов является p-n-переход, обладающий односторонней проводимостью. На рис. 24,*а* показан примерный вид вольт-амперной характеристики $I_а =$

$= \varphi(U_а)$. Из характерстнкн вндно, что прн прямом напряженнн $U_{пр}$ в десятые долн вольта прямой ток $I_{пр}$ имеет величину в десяткн миллиампер. Поэтому прямое сопротнвленне $R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ нмеет велнчниу в десятки ом. Прн обратном напряжеиии $U_{обр}$ в десяткн вольт обратиый ток $I_{обр}$ имеет величину в десяткн мнкроампер н обратное сопротивлеиие $R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$ имеет велнчиич в сотнн килоом.

Если обратное напряженне превысит максимально допустнмую велнчнну, изываемую напряжеиием пробоя $U_{проб}$, то *p-n*-переход пробьется. Его сопротнвленне $R_{обр}$ резко умеиьшится, а ток $I_{обр}$ увеличится.

Характерстнкн полупроводннковых диодов зависят от температуры. При повышеинн температуры возрастают прямой н обратный токи и выпрямнтельные свойства днода ухудшаются.

Параметры диодов

Параметры днодов обычно указывают для нх работы при 15—25° С.

Крутизна характернстнкн прн подаче прямого напряжеиия показывает, на сколько мнллнампер изменнтся ток диода при измененнн прнложенного напряжеиия на 1В, н определяется выраженнем

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta U} \text{ мА/В}.$$

Как вндио нз вольт-ампериой характеристнки (рис. 24), прн малом виешнем иапряженнн U крутизиа S мала. Прн увеличенни U крутизиа возрастает.

Внутрениее, нлн диффереицнальное, сопротнвленне днода переменному току определяется выраженнем

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} \text{ Ом}.$$

Прн малых прямых напряжениях R_i велнко, но при увелнчеиии прямого напряжеиия R_i снижается от десятков кнлоом при $U_{пр} = 5$ мВ до еднниц — десятков ом прн $U_{пр} = 1$ В. Внутреииее сопротивление обратиому току значнтельио превышает сопротнвлеиие прямому току и завнснт от рабочей температуры диодов.

Сопротнвленне постоянному току определяется как отиошеиие иапряжеиия к току в даииой точке вольт-амперной характерстнкн:

$$R_0 = \frac{U}{I} \text{ Ом}.$$

В прямом иаправленнн сопротнвление R_0 нмеет велнчниу от десятков до сотен ом, а в обратном — сотнн килоом — однн мегаом.

Наибольшее значение обратного напряжения $U_{обр.макс}$ — обратное напряжение, которое может быть приложено к диоду в течение длительного времени без опасности нарушения нормальной его работы.

Обратное пробивное напряжение $U_{проб}$ — обратное напряжение, при котором дифференциальное сопротивление становится равным нулю. При увеличении напряжения $U(|U| > |U_{проб}|)$ обратный ток резко возрастает и диод выходит из строя.

Наибольшее значение обратного тока $I_{обр.макс}$ — ток, соответствующий наибольшему значению обратного напряжения.

Выпрямленный ток $I_{ср}$ — среднее значение выпрямленного тока, протекающего в активной нагрузке при однополупериодном выпрямлении.

Максимально допустимый выпрямленный ток $I_{ср.макс}$ — предельно допустимое значение тока через диод, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе.

Прямое падение напряжения на диоде $U_{пр}$ при $I_{пр.макс}$.

К полупроводниковым диодам близки меднозакисные (купроксные) и селеновые вентили с запорным слоем на контакте металл — поликристаллический полупроводник. Однако эти вентили по всем показателям уступают диодам.

Широко применяют германиевые и кремниевые диоды. Они делятся на плоскостные (слоистые) и точечные. Плоскостные диоды используют для выпрямления переменного тока, точечные — для детектирования.

В плоскостном диоде на кристалл германия типа n наносят маленький кусочек индия. При температуре около 500° С индий расплавляется на поверхности германия и диффундирует в него. Часть германия растворяется в капле индия. После охлаждения между индием и кристаллом германия образуется слой, обладающий проводимостью типа p. Застывшая капля служит электрическим контактом с дырочным слоем, а контакт с германием выполняют из свинца или олова. Схема включения и устройство плоскостного диода показаны на рис. 24,*б* и *в*.

В точечном диоде образован контакт кристалла германия типа n с вольфрамовой проволочкой (рис. 24,*г*). В процессе формовки диода около контакта с проволочкой образуется небольшая область, обладающая проводимостью типа p. У точечных диодов мала междуэлектродная емкость из-за малой площади p-n-перехода. Поэтому их можно использовать на более высоких частотах. Но уменьшение площади контакта уменьшает величину допустимой мощности рассеяния. Кроме того, эти диоды обладают малой величиной обратного напряжения.

Полупроводниковые диоды имеют следующие достоинства: сравнительно большие значения выпрямленного тока и обратного напряжения, малое сопротивление прямому току, малое значение обратного тока, отсутствие затрат энергии на накал катода и высокий к. п. д., малые габариты и массу, большую механическую прочность и большой срок

службы. Недостатком диодов является зависимость параметров от температуры и влажности.

Некоторые типы плоскостных и точечных диодов: Д18, Д102, Д104, Д205, Д304, КД102.

Туннельные диоды

В туннельных диодах используют полупроводники с очень высокой концентрацией донорной и акцепторной примесей. Это приводит к тому, что вольт-амперная характеристика туннельного диода (рис. 25) значительно отличается от такой же характеристики обычного диода. При высокой концентрации примесей ширина *p-n*-перехода делается очень малой, а напряженность поля на переходе — большой.

Когда напряжение на туннельном диоде равно нулю, часть электронов переходит из *n*-области в *p*-область, такое же количество электронов переходит из *p*-области в *n*-область и ток равен нулю. Когда же на туннельный диод подается небольшое прямое напряжение, переход электронов из *n*-области в *p*-область становится более интенсивным, а переход электронов из *p*-области в *n*-область уменьшается. Результирующий туннельный ток увеличивается (участок *OA* характеристики). Когда обратный ток электронов из *p*-области в *n*-область исчезает, туннельный ток достигает максимального значения $I_{макс}$.

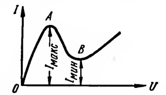


Рис. 25. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельный ток уменьшается, так как с возрастанием напряжения уменьшается число электронов, способных совершать туннельный переход. Этому соответствует падающий участок *AB* характеристики. Наличие этого участка на вольт-амперной характеристике позволяет использовать туннельный диод для генерирования и усиления электрических сигналов.

Туннельный диод обладает рядом достоинств: его характеристика мало зависит от температуры, он обладает большой скоростью срабатывания и поэтому используется в быстродействующих схемах.

Варикапы

При рассмотрении емкости *p-n*-перехода было выяснено, что зарядная емкость $C_б$ зависит от приложенного напряжения. С увеличением обратного напряжения эта емкость уменьшается. Эта зависимость используется в полупроводниковых диодах, называемых варикапами.

Варикап представляет собой электрический конденсатор, емкость которого управляется напряжением. Емкость диода изменяется в нужных пределах с помощью потенциометра, подключенного к источнику обратного напряжения. Варикапы применяют в колебательных контурах для автоматической подстройки частоты и частотной модуляции, в параметрических преобразователях частоты и усилителях. Применяе-

мые для этой цели диоды должны обладать малыми потерями в объеме полупроводника и его выводах и возможно меньшей зависимостью $C_б$ от температуры.

§ 16. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ

Полупроводниковый триод иначе называется транзистор, что в точном переводе двух английских слов «transfer resistor» означает «регулируемое сопротивление». Как и полупроводниковые диоды, триоды бывают двух типов — точечные и плоскостные. Физические

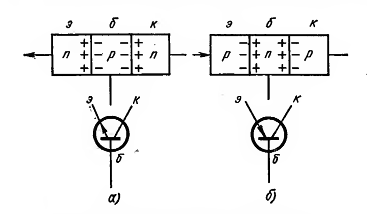


Рис. 26. Условные изображения транзисторов:
а — типа *n—p—n*, *б* — типа *p—n—p*

процессы, происходящие в этих типах триодов, аналогичны. В настоящее время применяют исключительно плоскостные транзисторы, так как они имеют ряд преимуществ перед точечными, выпуск которых прекращен.

Полупроводниковый триод в отличие от диода имеет два *p-n*-перехода. Он состоит из полупроводников различной проводимости. Если средняя область обладает дырочной проводимостью, а две крайние области — электронной, то это транзистор типа *n-p-n*. Если, наоборот, средняя область обладает электронной проводимостью, а крайние — дырочной, то это транзистор типа *p-n-p*. Условные изображения этих транзисторов показаны на рис. 26. Средняя область называется *базой*, а крайние области — *эмиттером* и *коллектором*.

По аналогии с электронной лампой эмиттер *э* выполняет функцию катода, база *б* — сетки и коллектор *к* — анода. Для обозначения величин, относящихся к эмиттеру, базе и коллектору, пользуются индексами в виде букв *э*, *б* и *к* соответственно. Например, токи $I_э$, $I_б$, $I_к$, напряжения $U_{э.б}$, $U_{к.б}$, $U_{б.э}$, $U_{к.э}$.

Транзисторы могут работать в трех основных схемах включения: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором (рис. 27).

Рассмотрим работу транзистора типа *p-n-p* на примере с х е м ы с о б щ е й б а з о й. Транзистор изобразим в виде двух *p-n*-переходов — эмиттерного и коллекторного (рис. 28). Подобно тому как это было в диоде, на каждом из *p-n*-переходов устанавливается контактная разность потенциалов. В цепи эмиттера (эмиттер — база) внешний источ-

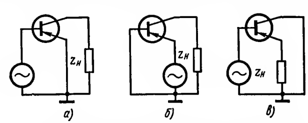


Рис. 27. Схемы включения транзисторов:
а — с общим эмиттером, *б* — с общей базой, *в* — с общим коллектором

ник постоянного тока $E_{э.б}$ включается в пропускном направлении, и этим контактная разность потенциалов уменьшается; сопротивление *p-n*-перехода уменьшается. В цепи коллектора, наоборот, внешний источник постоянного тока $E_{к.б}$ включается в запорном направлении, и этим контактная разность потенциалов увеличивается; сопротивление *p-n*-перехода возрастает.

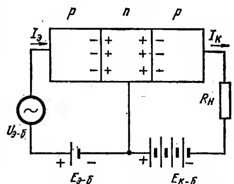


Рис. 28. Пример включения транзистора в схему с общей базой

При изготовлении транзистора добиваются того, чтобы удельная проводимость базы была намного меньше удельной проводимости эмиттера. Соответственно и концентрация основных носителей заряда в эмиттере будет намного больше, чем в базе.

Когда включена батарея в цепь эмиттера, начинается встречное движение через эмиттерный *p-n*-переход основных носителей заряда: дырок из области *p* в область *n*, а электронов из области *n* в область *p*. Но так как концентрация дырок в *p*-области намного больше концентрации электронов в *n*-области, то лишь часть дырок рекомбинирует с электронами в приконтактной области *p-n*-перехода. Остальная же масса дырок внедряется в область базы, где они являются неосновными носителями заряда. Это явление называется *инжекцией неосновных носителей заряда*.

Внедрившиеся в *n*-область дырки диффундируют в сторону коллекторного *p-n*-перехода. Так как толщина базы очень мала (4—5 мкм), большинство дырок не успевает рекомбинировать с электронами и

достигает коллекторного p-n-перехода. Попадая под действие ускоряющего поля коллекторного p-n-перехода и батареи $E_{к.б}$, дырки втягиваются в область коллектора. Имевшийся недостаток носителей заряда (дырок) в приконтактной области уменьшается, вместе с этим уменьшается и сопротивление коллекторного p-n-перехода. Это вызывает увеличение тока коллектора.

В области базы небольшая часть дырок рекомбинирует с электронами и образует ток $I_б$, протекающий в цепи базы. Поток дырок, инжектируемых эмиттером, распределяется в триоде между базой и коллектором, т. е.

$$I_э = I_б + I_к.$$

В плоскостных триодах ток $I_к$ всего на 1—5% меньше тока $I_э$. Ток $I_к$ проходит через нагрузочное сопротивление $R_н$ и создает на нем падение напряжения.

Если в цепь эмиттера ввести переменное напряжение $U_{в.б}$, ток в цепи эмиттера $I_э$ будет изменяться по тому же закону. Но изменение тока эмиттера вызывает изменение сопротивления коллекторного p-n-перехода и соответствующее изменение тока $I_к$ в цепи коллектора. На сопротивлении $R_н$ выделится переменное напряжение, которое будет воспроизводить колебания напряжения на входе.

Коэффициент усиления по напряжению K — это отношение напряжения, выделяемого на нагрузочном сопротивлении $R_н$, к напряжению на входе схемы:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{I_к R_н}{I_э R_{вх}}.$$

Но так как $I_к \approx I_э$, коэффициент усиления примерно равен отношению $R_н$ к $R_{вх}$.

Как было отмечено, входное сопротивление цепи эмиттера $R_{вх}$ имеет малую величину. Нагрузочное сопротивление $R_н$ во много раз превосходит величину входного сопротивления $R_{вх}$.

Следовательно, в схеме с общей базой происходит значительное усиление по напряжению. Усиление по току меньше единицы. Входное сопротивление невелико. Сопротивление коллекторного перехода очень большое, что позволяет включить в выходную цепь высокоомное сопротивление.

Принцип работы транзистора типа n-p-n такой же, как и типа p-n-p, а полярность включения источников питания противоположная.

В схеме с общим эмиттером (см. рис. 27,*а*) входным током является ток базы $I_б$, а выходным — ток коллектора $I_к$. Ток базы $I_б = I_э - I_к$. Но так как $I_к \approx (0{,}95 \div 0{,}99) I_э$, то $I_б$ сравнительно мал (во много раз меньше $I_к$). Следовательно, в схеме с общим эмиттером происходит не только усиление по напряжению, но и усиление по току и большое усиление по мощности. Входное сопротивление триода достигает десятков килоом. Эта схема широко используется в усилительных и импульсных схемах.

В схеме с общим коллектором (см. рис. 27,*в*) выходное напряжение снимается с сопротивления $R_н$. Оно меньше вход-

ного напряжения. Выходным током является ток эмиттера $I_э$, который больше входного тока $I_б$. Следовательно, в этой схеме включения происходит усиление по току. Схема с общим коллектором дает очень небольшое усиление мощности, а усиление по напряжению меньше единицы. Эта схема отличается высоким входным (порядка сотен тысяч ом) и низким выходным (сотни ом) сопротивлением. Схема используется лишь во входных каскадах усилителей или при необходимости согласования двух каскадов с общей базой или общим эмиттером.

Параметры триодов

Коэффициент усиления по току. Для схемы с общей базой статический коэффициент усиления по току α представляет собой отношение изменения тока коллектора $\Delta I_к$ к вызвавшему его изменению тока эмиттера $\Delta I_э$:

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \text{ при } U_{к.б} = \text{const}.$$

Для схемы с общим эмиттером статический коэффициент усиления по току β показывает, во сколько раз изменение тока коллектора $\Delta I_к$ больше изменения тока базы $\Delta I_б$

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \text{ при } U_{к.э} = \text{const}.$$

Но так как $\Delta I_к = \Delta I_э - \Delta I_б$, то получим

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Максимально допустимые величины напряжения на коллекторном и эмиттерном *p-n*-переходах, устанавливаемые исходя из опасности пробоя перехода $U_{к.доп}$ и $U_{э.доп}$.

Максимально допустимые значения токов коллектора и эмиттера, устанавливаемые исходя из опасности возникновения теплового пробоя перехода при больших токах, $I_{к.доп}$ и $I_{э.доп}$.

Максимально допустимая мощность рассеяния на коллекторном переходе $P_{к.макс}$.

Предельная частота передачи тока эмиттера f_α — это частота, при которой коэффициент усиления по току уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Граничная частота $f_т$ — это такая частота, при которой коэффициент передачи тока базы равен единице.

Максимальная частота $f_{макс}$ — это частота, при которой коэффициент усиления по мощности плоскостного триода равен единице.

Коэффициент шума $F_ш$ показывает, во сколько раз полная мощность шумов, выделяемая на нагрузке реального транзистора, больше мощности шумов на выходе идеального транзистора.

Статические характеристики

Как и в электроииых лампах, в траизисторах пользуются статическими характеристиками. Эти характеристики определяют соотношеиие между токами, проходящими в цепях траизистора, и иапряжеииями на его электродах. Характеристики различаются для разиых схем включеиия.

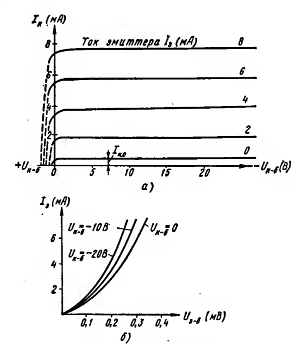


Рис. 29. Статические характеристики траизистора, включениого по схеме с *ОБ*:
а — выходные, *б* — входные

Характеристики транзистора в схеме с *ОБ*. Основиыми характеристиками являются выходиые и входиые. В ы х о д и ы е х а р а к т е р и с т и к и выражают зависимости выходиого тока от выходиого иапряжеиия. Для схемы с общей базой это зависимости $I_к = f(U_{к.\,б})$ при $I_э = \text{const}$ (рис. 29,*а*). В х о д и ы е х а р а к т е р и с т и к и являются зависимостями входного тока от входиого иапряжеиия. Для схемы с общей базой это зависимости $I_э = \varphi(U_{э.б})$) при $U_{к.б} = \text{const}$ (рис. 29,*б*).

Пользуются также характеристиками передачи и характеристиками обратиой связи. Х а р а к т е р и с т и к и п е р е д а ч и выражают зависимости выходиого тока от входиого тока. Для схемы с общей базой это зависимости $I_к = \varphi(I_э)$ при $U_{к.б} = \text{const}$. Х а р а к т е р и с т и к и о б р а т и о й с в я з и выражают зависимости

входиого напряжения от выходного иапряжения. Для схемы с общей базой это зависимости $U_{э.б.}=f(U_{к.б})$ при $I_э = \text{const}$.

Рассмотрим выходиые характеристики. Как видно из рис. 29,*а*, с увеличением тока эмиттера характеристики сдвигаются вверх. Ток $I_к$ на значительном участке характеристики очень мало зависит от приложенного иапряжеиия $U_{к.б}$. Но когда величина напряжения $U_{к\ б}$ приближается к нулю, ток $I_к$ начииает падать. Для прекращения тока $I_к$ иа коллектор подают напряжение $U_{к.б}$ обратной поляриости (прямое иапряжеиие).

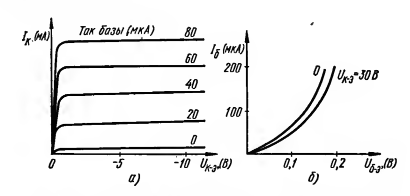


Рис. 30. Статические характеристики траизистора, включениого по схеме с *ОЭ*:
а — выходные, *б* — входные

При $I_э = 0$, т. е. при обрыве цепи эмиттера, коллекторный ток сиижается до иекоторого малого зиачения $I_{ко}$, называемого *начальным*, или *обратным током*. Величииа этого тока определяется концеитрацией иеосновных носителей заряда в базе и коллекторе и сильио зависит от температуры. С повышеиием температуры ток $I_{ко}$ возрастает и статические характеристики передвигаются вверх, что приводит к иестабильиости работы триода.

Теперь рассмотрим входиые характеристики. При напряжеиии $U_{к.\ б} = 0$ входиая характеристика (рис. 29,*б*) является обычиой характеристикой *p-n*-перехода при прямом включеиии.

Характеристики траизистора в схеме с *ОЭ*. Выходиые характеристики выражают зависимость $I_к = f(U_{к.э})$ при $I_б = \text{const}$ (рис. 30,*а*). Эти характеристики, в отличие от выходиых характеристик схемы с *ОБ*, идут из иачала коордииат. Объясияется это тем, что иапряжеиие коллекториой батареи $E_{к\ э}$ приложено к коллекториому и эмиттериому *p-n*-переходам. Напряжеиие, приложеиное к коллекторному *p-n*-переходу, равно $-E_{к.\ э}+U_б$. В начале координат, где $E_{к.\ э} = 0$, иа коллекториый переход подается положительиое напряжеиие $U_б$, которое закрывает *p-n*-переход, и ток $I_к = 0$. Характеристики имеют начальный участок, идущий круто, а затем переходят в пологие прямые.

В х о д н ы е   х а р а к т е р и с т и к и   выражают зависимость $I_б = \varphi(U_{б.э})$ при $U_{к.э} = \text{const}$ (рис. 30,*б*). С увеличением внешнего напряжения, приложенного к эмиттерному переходу в прямом направлении, больше носителей инжектируется в базу и большей становится вероятность их рекомбинации. Вследствие этого ток базы возрастает. С увеличением напряжения на коллекторе характеристики сдвигаются вправо. С увеличением напряжения $U_{к.э}$ ширина коллекторного *p-n*-перехода увеличивается, а толщина базы уменьшается. Вероятность рекомбинации носителей заряда в области базы уменьшается, вследствие чего уменьшается ток базы и характеристика смещается вниз.

Некоторые типы транзисторов: ГТ-109А, ГТ-313А, КТ-315, КТ-342.

Специальные типы полупроводниковых приборов

Кроме диодов, состоящих из одного *p-n*-перехода, и транзисторов, предназначенных для усиления сигналов, существуют специальные типы коммутационных полупроводниковых приборов. Они имеют S-

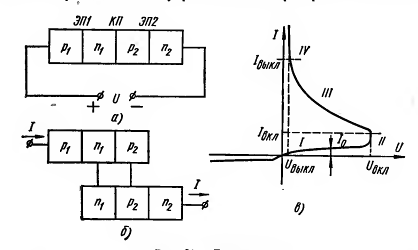


Рис. 31. Динистор:

а — схема включения, *б* — два транзистора, эквивалентные динистору, *в* — вольт-амперная характеристика

или N-образные формы статических характеристик. Широкое распространение такие приборы получили в импульсной технике и в автоматике.

Д и н и с т о р ы — четырехслойные диоды *p-n-p-n* — состоят из трех *p-n*-переходов, при этом средний переход включен навстречу двум крайним. При рабочей полярности внешнего напряжения (рис. 31,*а*) крайние переходы могут быть заменены двумя транзисторами типа *p-n-p* и *n-p-n* (рис. 31,*б*). Средний переход является как бы общим коллектором этих транзисторов.

Так как сопротивления эмиттерных переходов малы, а сопротивление коллекторного перехода велико, то почти все напряжение источника приложено к коллекторному *p-n*-переходу. Поэтому через прибор течет ток, равный току коллекторного перехода. Величина этого тока мало изменяется с изменением напряжения U (участок *I* на вольт-амперной характеристике, рис. 31,*в*).

При увеличении внешнего напряжения до величины $U_{вкл}$ рассмотренный процесс нарушается вследствие того, что обратное напряжение достигает величины, при которой возникает ударная ионизация в *p-n*-

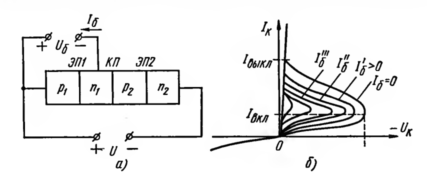


Рис. 32. Тиристор:
а — схема включения, *б* — вольт-амперные характеристики

переходе. Под действием сильного электрического поля коллекторного перехода электроны, движущиеся из *p*-базы в *n*-базу, и дырки, движущиеся из *n*-базы в *p*-базу, приобретают энергию, достаточную для разрушения валентных связей. В области коллекторного перехода образуются новые пары подвижных носителей. Вновь образовавшиеся электроны выбрасываются электрическим полем коллекторного *p-n*-перехода в *n*-базу. Концентрация основных носителей в области базы увеличивается (участок *II* на характеристике).

Электроны, подходя к эмиттерному *p-n*-переходу *ЭП1*, нейтрализуют в нем неподвижный положительный заряд ионизированных доноров, что приводит к снижению потенциального барьера. Поток дырок из эмиттера p_1 в базу n_1 увеличивается. Растет плотность потока дырок через коллекторный переход, а вместе с ним и число образуемых пар. Аналогично развивается процесс и в эмиттерном переходе *ЭП2*. Процесс развивается лавинообразно. Ток, проходящий через коллекторный переход и прибор, возрастает. Рост тока сопровождается падением напряжения на переходе в связи с увеличением в его области подвижных носителей. Этому соответствуют участки *III* и *IV* характеристики.

Параметрами динистора являются характерные точки на вольт-амперной характеристике, а также временные интервалы перехода из одного режима в другой. Так, время включения $\tau_{вкл}$ оценивается интервалом времени, в течение которого напряжение на диоде уменьшается до заданного уровня, время выключения $\tau_{выкл}$ — интервалом вре-

мени, в течение которого на диод должно подаваться запирающее напряжение, выключающее диод.

Т и р и с т о р ы — управляемые четырехслойные переключающие триоды. Схема их включения показана на рис. 32,*а*. К одной из баз подключен источник внешнего напряжения, за счет которого течет ток $I_б$. В этом приборе p_1 — эмиттер, n_1 и p_2 — базы, n_2 — коллектор. Вольт-амперные характеристики тиристора изображены на рис. 32,*б*. Как видно из рисунка, при $I_б = 0$ кривая повторяет характеристику динистора. Но по мере увеличения $I_б$ напряжение $U_{вкл}$ уменьшается, а ток $I_{вкл}$ увеличивается.

§ 17. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Фотоэлементами называют приборы, служащие для превращения энергии света в энергию электрического тока. Они имеют разнообразное применение: в установках для передачи изображений (фототелеграмм), в телевидении, звуковом кино, устройствах автоматики и т. д. Действие фотоэлементов основано на использовании трех видов фотоэффекта: внешний, внутренний и вентильный.

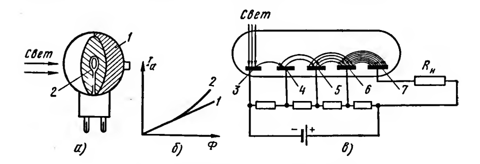


Рис. 33. Фотоэлектрические приборы:
а — фотоэлемент, *б* — световая характеристика, *в* — фотоэлектронный умножитель; *1* — катод, *2*,*7* — аноды, *3* — фотокатод, *4*,*5* и *6* — эмиттеры

В н е ш н и й ф о т о э ф ф е к т (фотоэмиссия) — это проявление способности вещества эмиттировать электроны под воздействием светового потока. Используя принцип внешнего фотоэффекта, изготовляют электровакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

В н у т р е н н и й ф о т о э ф ф е к т (фотопроводимость) — изменение проводимости полупроводников при изменении интенсивности падающего на них светового потока. Фотоэлементы, использующие внутренний фотоэффект, называются фоторезисторами.

В е н т и л ь н ы й ф о т о э ф ф е к т — возникновение э. д. с. на *p*-*n*-переходе при воздействии на него светового потока. Полупроводниковые приборы, использующие вентильный фотоэффект, составляют особую группу фотоэлементов — фотодиоды, солнечные батареи, фототриоды.

Электровакуумные фотоэлементы. Внешний вид электровакуумного фотоэлемента показан на рис. 33,*а*. Катод *1* представляет собой пленку из вещества, эмиттирующего электроны под воздействием светового потока. Анод *2* имеет форму кольца. Катоды электровакуумных фотоэлементов изготовляют из щелочных и щелочноземельных металлов. На практике широкое применение получили кислородно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые фотокатоды.

В кислородно-цезиевом фотокатоде на стенку баллона наносят слой серебра, поверхность которого затем подвергают окислению. На образовавшуюся окись серебра наносят путем испарения слой цезия. При этом происходит частичное окисление цезия и восстановление серебра. При дальнейшей термообработке фотокатода на поверхности окиси цезия образуется одноатомный слой цезия. При изготовлении сурьмяно-цезиевых фотокатодов на стенку баллона путем испарения наносят слой сурьмы, который затем прогревают в парах цезия. Эмиссионные свойства этого катода значительно хуже, чем кислородно-цезиевого.

Чувствительность фотоэлемента. При освещении фотоэлемента его катод начинает эмиттировать электроны и в выходной цепи фотоэлемента возникает ток $I_а$, величина которого пропорциональна интенсивности светового потока Ф.

$$I_а = K_\Sigma \Phi.$$

При изменении величины светового потока будет изменяться величина тока, а также величина напряжения на анодной нагрузке. Величина $K_\Sigma = \frac{I_а}{\Phi}$ называется интегральной чувствительностью или интегральной отдачей фотоэлемента. Интегральная чувствительность кислородно-цезиевого катода 30—40 мкА/лм, а сурьмяно-цезиевого 80—100 мкА/лм.

Параметром фотокатода является также спектральная чувствительность. Она характеризует величину фотоэлектронной эмиссии, возникающей под действием светового потока Φ_ν определенной длины волны:

$$K_\nu = \frac{I_а}{\Phi_\nu}.$$

Зависимость $I_а$ от Ф [$I_а = f(\Phi)$ при $U_а = \text{const}$] называется *световой характеристикой* (рис. 33,*б*). Прямолинейная характеристика (кривая *1*) получается в вакуумных кислородно-цезиевых фотоэлементах и сурьмяно-цезиевых фотоэлементах с металлической подложкой. В газонаполненных и вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементах без металлической подложки характеристика линейна только при малых значениях Ф. С увеличением величины Ф линейность характеристики нарушается (кривая *2*).

Газонаполненные фотоэлементы. В приборах, наполненных инертным газом (гелием, неоном, аргоном и др.), ток фотоэлектронной эмиссии возрастает в результате ионизации газа. Но эти фотоэлементы имеют недостаток, ограничивающий их применение: в них может возник-

нуть газовый разряд, при котором фотоэлемент выходит из строя; кроме того, в связи с малой подвижностью ионов они обладают большой инерционностью при освещении фотоэлемента импульсами света. К этому типу приборов относятся и фотоэлектронные умножители (рис. 33,*в*), в которых используется фотоэлектронная и вторично-электронная эмиссия. Под действием света фотокатод *3* эмиттирует электроны, которые падают на первый эмиттер *4* и выбивают из него вторичные электроны. Эти электроны в свою очередь падают на второй эмиттер *5* и выбивают из его поверхности вторичные электроны. Одним электроном выбивается примерно 8—12 вторичных электронов. Поэтому ток, протекающий в нагрузке $R_н$, во много раз больше тока фотокатода.

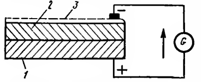


Рис. 34. Устройство вентильного и селенового фотоэлементов:
1 — металлический электрод, *2* — слой селена, *3* — полупрозрачный слой золота

Фоторезисторы. Получая энергию от светового потока, электроны могут оторваться от атомов кристаллической решетки и превратиться из связанных в полусвободные. Вследствие этого проводимость фоторезисторов под действием светового потока возрастает. Если к концам такого резистора приложить некоторую разность потенциалов, то величина протекающего в этой цепи тока будет зависеть от освещенности фоторезистора.

Вентильные фотоэлементы. Их особенностью является то, что за счет энергии светового потока в них создается внешняя э. д. с., т. е. происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую. На рис. 34 показано устройство вентильного селенового фотоэлемента. На металлический электрод *1* нанесен полупроводниковый слой *2* селена, поверх которого осажден тонкий полупрозрачный слой *3* золота. Этот слой является вторым электродом фотоэлемента.

В процессе изготовления между слоями *2* и *3* образуется тонкий запорный слой с односторонней проводимостью. При освещении фотоэлемента со стороны слоя *2* происходит одностороннее перемещение электронов, освобождающихся под действием света. Обратному переходу электронов из золота в селен препятствует разность потенциалов запорного слоя. Вследствие этого на электродах появляется э. д. с., полярность которой показана на рисунке.

Недостатками селенового фотоэлемента являются невысокая чувствительность и инерционность, появляющаяся уже в области звуковых частот.

Для преобразования энергии излучения солнца в электрическую энергию применяют кремниевые фотоэлементы, обладающие наибольшим к. п. д. (около 10%) и называемые *солнечными батареями*.

В технике находят широкое применение фотодиоды, которые представляют собой обычные полупроводниковые диоды, работающие в режиме обратного смещения и имеющие в корпусе отверстие, закрытое стеклом для пропускания света на *p-n*-переход. Достоинством кремниевых фотодиодов является то, что они имеют весьма незначительный

обратный темновой ток, отличаются высокой чувствительностью (4—30 мА/лм), компактны и просты.

Фотодиоды могут применяться не только как вентильные фотоэлементы, когда они работают в качестве самостоятельных источников тока, но и как фоторезисторы в цепи источника постоянного тока. Аналогично работают *фототриоды*, в которых управление током коллектора осуществляется посредством освещения эмиттерного перехода. Фототранзисторы позволяют управлять током коллектора одновременно с помощью света и электрического напряжения, подводимого к базе.

Маркировка электронных приборов

Условные обозначения приемно-усилительных радиоламп состоят из четырех элементов.

Первый элемент — число, указывающее напряжение накала в вольтах.

Второй элемент — буква, характеризующая тип лампы (Д — диод, Х — двойной диод, С — триод, Н — двойной триод, Г — диод-триод, Ж — пентод с короткой характеристикой, К — пентод с удлиненной характеристикой, Ф — триод-пентод, Э — тетрод, Р — двойной тетрод и пентод, Б — диод-пентод, В — лампа со вторичной эмиссией, П — выходной пентод и лучевой тетрод, А — частотопреобразовательная лампа, И — триод-гексод, триод-гептод, триод-октод, Е — электронно-световой индикатор, Ц — кенотрон).

Третий элемент — число, указывающее порядковый номер типа лампы.

Четвертый элемент — буква, характеризующая конструктивное оформление (С — в стеклянном баллоне, К — в керамической оболочке, П — миниатюрная, диаметром 19 и 22,5 мм, Г — сверхминиатюрная, диаметром свыше 10 мм, Б — сверхминиатюрная, диаметром до 10 мм, А — сверхминиатюрная, диаметром до 6 мм, Р — сверхминиатюрная диаметром до 4 мм, Л — с замком в ключе цоколя, Д — с дисковыми выводами, Ж — типа «желудь», Н — сверхминиатюрная металлокерамическая, без обозначения — лампа с металлическим баллоном).

Условные обозначения генераторных и модуляторных ламп также состоят из четырех элементов.

Первый элемент — буквы, характеризующие назначение лампы и частотный диапазон ее применения: Г — генераторная, ГК — генераторная длинноволновая и коротковолновая (с предельной частотой до 30 МГц), ГУ — генераторная УКВ (с предельной частотой от 30 до 300 МГц), ГС — генераторная сантиметровая (с предельной частотой свыше 300 МГц), ГМ — модуляторная.

Второй элемент — буква, характеризующая электрический режим, для которого предназначена лампа, например И — импульсный.

Третий элемент — число, указывающее порядковый номер типа прибора.

Четвертый элемент — буква, обозначающая характер принудительного охлаждения; А — водяное, Б — воздушное.

Условные обозначения полупроводниковых приборов состоят из пяти элементов.

Первый элемент — буква или цифра, указывающая исходный материал (Г или 1 — германий, К или 2 — кремний, А или 3 — арсенид галлия).

Второй элемент — буква, характеризующая подкласс прибора (Т — транзисторы, за исключением полевых; П — полевые транзисторы; Д — выпрямительные, универсальные, импульсные диоды; Ц — выпрямительные столбы и блоки; А — сверхвысокочастотные диоды; В — варикапы ; И — туннельные и обращенные диоды; Л — излучающие диоды; Н — диодные тиристоры; У — триодные тиристоры, Г — генераторы шума; Б — приборы с объемным эффектом; К — стабилизаторы тока, С — стабилитроны).

Третий элемент определяет назначение прибора.

Четвертый и *пятый элементы* определяют порядковый номер разработки технологического типа прибора и обозначаются от 01 до 99.

Условное обозначение полупроводниковых приборов, разработанных до 1964 года, состоит из двух или трех элементов.

Первый элемент — буква Д для диодов, П — для плоскостных транзисторов.

Второй элемент — число, которое указывает на область применения.

Третий элемент — буква, характеризующая классификационную группу данной разработки прибора.

Электроннолучевые трубки маркируются четырьмя элементами.

Первый элемент — число, обозначающее величину диаметра или диагонали экрана в сантиметрах. Первый элемент передающих телевизионных трубок — буква Л.

Второй элемент — буквы, характеризующие назначение трубки (ЛО — электроннолучевые с электростатическим отклонением луча, ЛМ — осциллографические с электромагнитным отклонением луча, ЛК — кинескопы с электромагнитным отклонением луча, И — передающие телевизионные трубки).

Третий элемент — число, указывающее порядковый номер трубки.

Четвертый элемент — буква, обозначающая цвет свечения люминофора экрана (А — синий, Б и В — белый, П — зеленый, М — голубой).

Контрольные вопросы

1. Что такое работа выхода электронов?
2. В чем заключается различие между режимами пространственного заряда и насыщения?
3. Что такое крутизна, коэффициент усиления и внутреннее сопротивление триода?
4. Что называется динатронным эффектом в тетроде?
5. Каковы особенности конструкции высокочастотных пентодов?
6. Объясните по схеме, показанной на рис. 14, принцип действия электроннолучевой трубки.

7. Объясните вольт-амперную характеристику газового разряда (см. рис. 18, *в*).

8. Почему после зажигания тиратрона сетка теряет свое управляющее действие?

9. В чем заключается вредное влияние инерции электронов при работе электронных ламп на СВЧ?

10. Что называется электронной и дырочной проводимостями?

11. Какие примеси в полупроводниках называют донорными и какие акцепторными?

12. Чем обусловлен запирающий слой в электронно-дырочном переходе и как он изменится, если к нему приложить прямое и обратное напряжение?

13. В чем заключаются особенности трех схем включения транзисторов?

14. Объясните выходные и входные характеристики транзистора.

15. Чем отличается внутренний фотоэффект от внешнего?

Глава III
ВЫПРЯМИТЕЛИ

§ 18. СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Выпрямители — это устройства, преобразующие переменный ток в ток одного направления. Раньше это преобразование осуществлялось с помощью электрических машин — мотор-генераторов, но они требуют постоянного обслуживания, занимают много места и имеют низкий к. п. д. Поэтому в настоящее время для преобразования переменного тока в ток одного направления применяют более экономичные и удобные в эксплуатации ионные, электровакуумные и полупроводниковые приборы. Эти приборы имеют нелинейные вольт-амперные характеристики и обладают вентильным свойством. В проводящем направлении их сопротивление очень мало, а в непроводящем — очень велико. Поэтому при подведении положительной полуволны переменного напряжения вентиль открыт и он пропускает ток; при подведении отрицательной полуволны этого напряжения вентиль закрыт и ток не проходит.

Выпрямитель состоит из трех основных элементов: трансформатора, вентиля и сглаживающего фильтра. Иногда в схему входит также стабилизатор напряжения или тока. Трансформатор позволяет изменять питающее напряжение с целью получения заданной величины выпрямленного напряжения. В качестве вентилей могут использоваться полупроводниковые и вакуумные диоды, газотроны и тиратроны. Рассмотрим простейшие схемы выпрямителей.

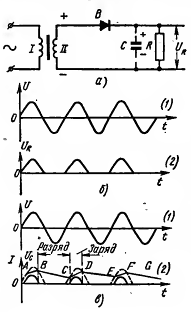


Рис. 35. Однополупериодный выпрямитель:
а — схема, *б* и *в* — рабочие процессы в выпрямителе

На рис. 35,*а* показана схема однополупериодного выпрямителя. Последовательно со вторичной обмоткой *II* трансформатора и полупроводниковым вентилем *В* включено сопротивление R. Рабочие процессы в этом случае изображены на рис. 35,*б*. На графике *1* показано изменение напряжения на обмотке *II* трансформатора. Благодаря выпрямительному свойству ток через вентиль проходит только во время положительного полупериода напряжения. Этот ток, протекая через сопротивление R, создает на нем падение напряжения $U_R = IR$.

Ток I и напряжение U_R являются пульсирующими (график *2*). Чтобы сгладить пульсации, параллельно нагрузочному сопротивлению включают конденсатор C достаточно боль-

шой емкости (рис. 35,*а*). Рабочие процессы в этом случае поясняет рнс. 35,*в*. На графнке *1* показано изменение напряжения на обмотке *II* трансформатора. На графнке *2* пунктнром показаны положнтельные полуволны напряжения, а кривая *ABCDEFG* изображает напряженне на конденсаторе *C*.

Напряженне на вентиле в любой момент времени равно алгебраической сумме напряженнй на обмотке *II* трансформатора н на конденсаторе *C*. На рнсунке показана полярность напряженнй на конденсаторе и обмотке *II* трансформатора для положительного полупернода напряжения. Очевндно, ток через вентиль проходит тогда, когда напряженне на обмотке трансформатора не только положительное, но и

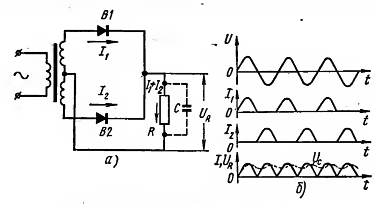


Рис. 36. Двухполупериодный выпрямитель:
а — с двумя вентилями. *б* — рабочие процессы в выпрямителе

больше напряжения конденсатора. При этом пронсходит заряд конденсатора через вентнль (участкн *AB*, *CD*, *EF*).

Когда же напряжение на обмотке трансформатора отрнцательное или меньше напряжения конденсатора, ток через вентиль не проходнт и пронсходит разряд конденсатора через сопротивление *R* (участки *BC*, *DE*, *FG*). Разряд конденсатора происходит значнтельно медленнее заряда, так как велнчнна нагрузочного сопротивления *R* значнтельно больше сопротивлення вентиля $R_в$.

Двухполупернодный выпрямитель представляет собой соединенне двух однополупернодных выпрямнтелей, питающнх общую нагрузку *R*. На рис. 36,*а* показана схема с двумя вентнлями, в которой вторнчная обмотка трансформатора имеет отвод от средней точкн. Когда напряженне в верхнем конце обмоткн трансформатора положнтельно относительно средней точки, ток I_1 идет через вентнль *B1* в направленни, указанном стрелкой.

Прн этом напряженне на ннжнем конце обмоткн отрнцательно, и ток через вентиль *B2* не проходнт. Через полупернод полярность напряженнй на концах обмотки меняется на обратную. Вентнль *B1* запирается, а вентиль *B2* открывается, и ток I_2 проходнт через вентнль *B2*. В обоих случаях через нагрузочное сопротивленне *R* токн I_1 н I_2

проходят в одном направлении и создают суммарный пульсирующий ток I, равный $I_1 + I_2$. Рабочие процессы в выпрямителе показаны на рис. 36,*б*.

В мостовой схеме двухполупериодного выпрямителя (рис. 37,*а*) вторичная обмотка не имеет отвода от средней точки и используется полностью в течение положительного и отрицательного полупериодов напряжения. В положительный полупериод открыты вентили *1* и *3* (вентили *2* и *4* закрыты), в отрицательный полупериод открыты вентили *2* и *4* (вентили *1* и *3* закрыты).

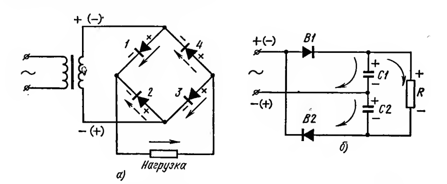


Рис. 37. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (*а*) и схема выпрямителя удвоенного напряжения (*б*)

На рис. 37,*б* изображена схема, позволяющая получить удвоенное выпрямленное напряжение без повышающего трансформатора. В течение положительного полупериода напряжения проводит ток вентиль *В1* и заряжается конденсатор C_1, а в течение отрицательного полупериода проводит ток вентиль *В2* и заряжается конденсатор C_2. Напряжения на этих конденсаторах складываются и подаются на сопротивление R, через которое проходит разрядный ток. Такие выпрямители используют для питания схем электронных усилителей.

§ 19. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Как мы установили, выпрямленный ток и напряжение на нагрузочном сопротивлении являются пульсирующими. Для сглаживания пульсаций параллельно нагрузочному сопротивлению можно включить конденсатор. Для более совершенного сглаживания пульсации вместо одного конденсатора между выпрямителем и нагрузочным сопротивлением R включают сглаживающий фильтр из элементов L и C. Схема такого сглаживающего фильтра и схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром показаны на рис. 38,*а* и *б*. Конденсаторы C_1 и C_2, включенные в параллельные ветви фильтра, имеют емкость, равную нескольким единицам или десяткам микрофарад. Дроссель со стальным сердечником, включенный в последовательную ветвь, имеет индуктивность порядка нескольких единиц или десятков генри.

Сопротивления этих элементов зависят от частоты: сопротивление дросселя незначительно для постоянной составляющей и большое для переменной составляющей тока. Конденсатор, наоборот, не пропускает постоянный ток и его сопротивление незначительно для переменной составляющей тока. Переменная составляющая тока проходит через конденсатор C_1, сопротивление которого значительно меньше сопротивления дросселя L. Постоянная составляющая тока проходит через дроссель L и нагрузочное сопротивление R, на котором выделяется выпрямленное напряжение.

Сопротивление конденсатора C_2 для переменной составляющей тока значительно меньше сопротивления R. Поэтому часть переменной составляющей тока, проходящая через дроссель L, ответвляется через конденсатор C_2. Таким образом, переменная составляющая тока, которая является вредной, не допускается на нагрузочное сопротивление фильтром. Рассмотренный фильтр называется *однозвенным*. Применяют также фильтры, состоящие из нескольких звеньев.

В сглаживающих фильтрах широко используют электролитические конденсаторы, рассчитанные на соответствующие напряжения. Дроссель фильтра имеет стальной сердечник с числом витков, равным нескольким тысячам.

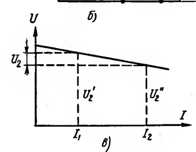


Рис. 38. Сглаживание пульсаций:
а — однозвенный фильтр L и C, б — схема выпрямителя с фильтром, в — нагрузочная характеристика

Широко применяется упрощенная схема фильтра, в которой вместо дросселя L включено сопротивление $R_ф$, равное нескольким тысячам или десяткам тысяч ом. Такую схему применяют лишь при малых токах, так как на сопротивлении $R_ф$ происходит некоторая потеря постоянного напряжения.

Выпрямленное напряжение U_2 зависит от величины тока нагрузки I. Эта зависимость $U_2 = \varphi(I)$ при неизменном напряжении питания называется *нагрузочной* или *внешней характеристикой выпрямителя* (рис. 38,*в*). Как видно из рисунка, при увеличении тока нагрузки выпрямленное напряжение уменьшается. Это обусловлено тем, что с увеличением тока увеличивается падение напряжения в обмотках силового

трансформатора, кенотронах и на дросселе фильтра. Например, если потребляемый ток изменяется от I_1 до I_2, то выходное напряжение будет изменяться от U'_2 до U''_2.

Наибольший допустимый ток в нагрузке определяется наибольшим допустимым выпрямленным током. Так, например, для кенотрона 5Ц8С максимальный выпрямленный ток 210 мА. Нижним пределом тока является работа выпрямителя вхолостую при отключенном сопротивлении нагрузки. Если нагрузка включена через фильтры типа *LC* (рис.38, *б*), то выходное напряжение выпрямителя повышается и достигает амплитуды переменного напряжения на анодах кенотрона.

Если в фильтре выпрямителя применяют электролитические конденсаторы, то имеется опасность их пробоя при отключенной нагрузке, так как они имеют малый запас электрической прочности. Поэтому нужно следить за тем, чтобы напряжение на электролитических конденсаторах не оказалось больше допустимого (рабочего).

§ 20. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Многие радиоустройства требуют большой стабильности напряжения и тока. В зависимости от назначения радиоустройств допускаемая нестабильность питающих напряжений 5—0,001%. Напряжение сети переменного тока может изменяться на 10% и более, кроме того, напряжение на выходе выпрямителя зависит от сопротивления нагрузки. Чтобы напряжение, питающее схему радиоустройства, мало зависело от изменений напряжения сети и сопротивления нагрузки, применяют стабилизаторы. Существует большое количество различных способов и схем стабилизации.

Наиболее распространенными типами стабилизаторов являются газовые, электронные, полупроводниковые стабилитроны, бареттеры. Стабилитрон применяют при малых мощностях при токах 20—30 мА. При изменении питающего напряжения на ±10% напряжение на выходе изменяется приблизительно на 1%.

Электронные стабилизаторы получили широкое распространение, так как обеспечивают высокую стабильность выходного напряжения, достигающую сотых и тысячных долей процента.

Одна из простейших схем стабилизатора показана на рис. 39. Лампа *Л1* служит регулятором напряжения; лампа *Л2* действует как усилитель, в цепи анода которого включено сопротивление R_a. Напряжение на сетке этой лампы определяется как разность между положительным напряжением делителя $E_{д1}$ и напряжением стабилитрона E_s:

$$E_{c2} = E_{д1} - E_s .$$

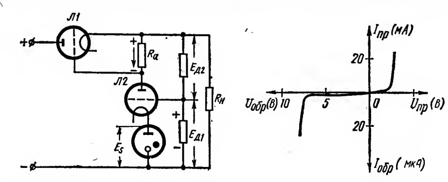
Напряжение стабилитрона постоянно и не зависит от тока. Большая часть напряжения $E_{д1}$ скомпенсирована напряжением стабилитрона E_s. Поэтому небольшое изменение напряжения $E_{д1}$ приведет к относительно значительному изменению напряжения на сетке лампы *Л2*.

Пусть напряжение на нагрузочном сопротивлении $R_н$, а следовательно, и напряжение $E_{д1}$ несколько увеличились. Это вызвало значительное увеличение напряжения на сетке лампы *Л2* и сильное увеличе-

нне тока этой лампы. Паденне напряження на сопротнвленни $R_а$ является отрнцательным смещеннем для лампы *Л1*. Анодный ток лампы *Л1* уменьшнлся, возросло паденне напряжения на этой лампе, а напряженне на $R_н$ осталось почтн постоянным.

Прн уменьшеннн напряження на входе стабнлнзатора нлн уменьшеннн напряжения на $R_н$ отрнцательное смещенне на сетке лампы *Л1* уменьшается, возрастает ток н уменьшается паденне напряження на лампе. Напряженне на $R_н$ остается почтн постоянным.

Полупроводниковые стабилитроны. Для стабнлнзацнн напряження нспользуют кремнневые плоскостные дноды с нормнрованнымн напряженнямн пробоя н резкнм нарастаннем тока в точке пробоя, которые получнли названне опорных днодов нлн полупроводннковых стабнлнтронов.



Рнс. 39. Схема электронного стабнлнзатора

Рнс. 40. Вольт-амперная характернстнка кремниевого стабилнтрона

На рнс. 40 показана вольт-амперная характернстика кремнневого стабнлитрона. Прн небольшнх обратных напряженнях $U_{обр}$ через днод протекает весьма малый обратный ток, но начнная с некоторого значення $U_{обр} = U_{пор}$, называемого пороговым, наступает электрнческнй пробой. Однако кремнневый днод способен восстанавлнваться после электрнческого пробоя н становнтся способным к дальнейшей работе. Именно это свойство кремнневых стабнлнтронов позволяет нспользовать нх в качестве нсточннков нензменного опорного напряження, нмеющего велнчину от нескольких вольт до нескольких сот вольт в завнснмости от тнпа этнх днодов. Крутнзна прямого тока кремнневого стабнлнтрона в несколько раз больше крутнзны вакуумного днода. Прн этом кремниевый стабнлнтрон начнназет проводнть ток только прн положнтельном смещеннн порядка 0,4 В.

Пренмуществом кремнневых стабилнтронов перед газовымн является отсутствне напряження зажигания, превышающего напряжение стабнлнзацнн, н возможность стабнлнзации низкнх напряженнй (еднннцы — десяткн вольт). Кремнневые стабнлнтроны нмеют обратный ток, меньшнй одного мнкроампера, высокое обратное напряженне, нечувствнтельны к влажностн н способны работать прн температурах

до 125° С. Кремниевый стабилитрон включается по такой же принципиальной схеме, что и газовый.

Бареттеры используют для поддержания постоянства тока накала при малых мощностях. Бареттер состоит из стальной или вольфрамовой проволоки, помещенной в атмосфере водорода внутри стеклянного баллона. С увеличением приложенного к концам проволоки напряжения растет ток и повышается температура проволоки. Вместе с этим возрастает и ее сопротивление. Можно подобрать диаметр и длину про-

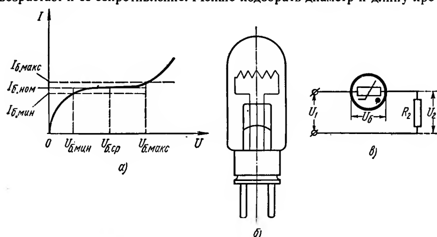


Рис. 41. Бареттер:
а — вольт-амперная характеристика, *б* — устройство, *в* — схема включения

волоки, а также давление водорода так, чтобы увеличение сопротивления проволоки было прямо пропорционально увеличению приложенного к бареттеру напряжения. Очевидно, что величина тока в цепи будет оставаться почти постоянной.

Вольт-амперная характеристика бареттера изображена на рис. 41,*а*. На пологом участке (от $U_{б.мин}$ до $U_{б.макс}$) ток почти не зависит от приложенного напряжения. Если последовательно с бареттером включить нить накала, то при изменении напряжения на бареттере в пределах этого пологого участка ток накала останется постоянным. Интервал от $I_{б.мин}$ до $I_{б.макс}$ называется *интервалом бареттирования*. На рис. 41,*б* и *в* показаны устройство и схема включения бареттера.

Контрольные вопросы

1. По схемам (см. рис 35 и 36) объясните принцип действия однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
2. Каковы назначение и принцип действия сглаживающего фильтра выпрямителя?
3. Объясните принцип действия электронного стабилизатора.
4. Каков принцип действия бареттера?
5. Объсните принцип действия полупроводникового стабилитрона.

Глава IV
УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Усилителями низкой частоты называют устройства, предназначенные для усиления электрических колебаний звуковых частот. Усилители подразделяют по различным признакам на несколько типов.

По назначению различают усилители напряжения и усилители мощности. Усилители напряжения предназначены для повышения напряжения, получаемого от первичного источника низкочастотных колебаний, до заданной величины. Усилители мощности служат для питания нагрузки током относительно большой мощности, изменяемым в соответствии с изменением входного напряжения.

По роду применяемых усилительных элементов усилители делят на ламповые, в которых усилительным элементом является электронная лампа; полупроводниковые (усилительный элемент — транзистор); магнитные (усилительный элемент — дроссель, подмагничиваемый постоянным током); диэлектрические (усилительный элемент — конденсатор, диэлектрическая проницаемость которого сильно зависит от величины напряженности электрического поля).

Усилительный элемент в сочетании с необходимыми для его работы радиодеталями (резисторами, конденсаторами) представляет собой одну ступень усиления, называемую *усилительным каскадом*.

§ 21. ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

Свойства усилителя характеризуются его показателями. Основными показателями усилителя являются: коэффициент усиления; номинальная выходная мощность, отдаваемая в цепь потребителя; чувствительность (номинальное входное напряжение); диапазон частот, или полоса пропускания; коэффициент полезного действия; искажения, вносимые усилителем.

Коэффициент усиления. Различают коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности. Коэффициент усиления по напряжению — это отношение напряжения на выходе усилителя $U_{вых}$ к напряжению на его входе $U_{вх}$:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}},$$

аналогично

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}; \quad K_р = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}.$$

Если усилительное устройство состоит из нескольких последовательно включенных каскадов, то общий коэффициент усиления такого усилителя равен произведению коэффициентов усиления его отдельных каскадов

$$K_{общ} = K_1 K_2 K_3 \ldots K_n. \qquad (12)$$

Для оценки величины коэффициента усиления часто пользуются логарифмическими единицами — децибелами или неперами*. Это обусловлено тем, что между звуковой энергией и громкостью звука, воспринимаемой человеческим ухом, существует логарифмическая зависимость. Коэффициент усиления, выраженный в децибелах, определяется как двадцать десятичных логарифмов отношения напряжения на выходе к напряжению на входе усилителя.

$$K_{дБ} = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 20 \lg K \tag{13}$$

или

$$K_{Нп} = \ln K = \ln \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

При помощи логарифмических единиц можно просто подсчитать общий коэффициент усиления усилительного устройства, состоящего из нескольких каскадов:

$$K_{дБ} = K_{1дБ} + K_{2дБ} + K_{3дБ} + \cdots + K_n,$$

что легко получить, логарифмируя выражение (12).

Номинальная выходная мощность — та наибольшая мощность, развиваемая усилителем на нагрузке, при которой искажение сигнала не превышает заданной величины. Номинальную выходную мощность усилителя указывают в его паспортных данных.

Чувствительность — такое амплитудное значение выходного напряжения, при котором усилитель отдает в нагрузку номинальную выходную мощность.

Диапазон частот, или полоса пропускания усилителя — область частот, в пределах которой коэффициент усиления изменяется не больше, чем это допустимо по заданным техническим условиям. Допускаемые изменения величины коэффициента усиления обычно не должны превышать 1—3 дБ (12—40%).

Коэффициент полезного действия является очень важным показателем усилителя при питании его от источников постоянного тока (батарей и аккумуляторов). Различают электрический и промышленный к. п. д.

Электрический к. п. д. — это отношение полезной мощности P_1, развиваемой усилительным каскадом, к мощности P_0, потребляемой от источника анодного (коллекторного) питания:

$$\eta = \frac{P_1}{P_0}. \tag{14}$$

Промышленный к. п. д. — это отношение полезной мощности P_1, развиваемой усилительным каскадом, к общей мощности P, потребляемой от всех источников питания:

$$\eta_п = \frac{P_1}{P}. \tag{15}$$

* 1 Нп=8,7 дБ; 1дБ = 0,115 Нп.

Искажения, вносимые усилителем. Качество усилителя определяется главным образом тем, в какой мере он удовлетворяет требованию неискаженного усиления передаваемых сигналов. Если форма кривой напряжения на выходе $U_{вых}$ повторяет форму кривой напряжения на входе $U_{вх}$, то усилитель не вносит искажений. Искажения, вносимые усилителем, могут быть следствием ряда причин. Соответственно различают следующие виды искажений: частотные, фазовые и нелинейные.

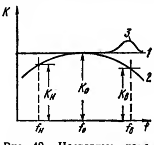


Рис. 42. Частотные характеристики усилителя

Частотными искажениями принято называть искажения, вызванные неодинаковым усилением сигналов разных частот. Для определения частотных искажений пользуются частотной характеристикой, которая представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемых колебаний. На рис. 42 прямая *1*, параллельная оси абсцисс, изображает частотную характеристику идеального усилителя, который не вносит частотных искажений; кривая *2* — частотную характеристику реального усилителя. K_0 — коэффициент усиления на средней частоте.

В реальном усилителе из-за влияния реактивных элементов схемы (индуктивности и емкости) коэффициенты усиления в области нижних и верхних частот диапазона $K_н$ и $K_в$ меньше коэффициента усиления

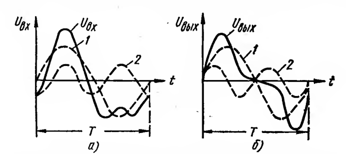


Рис. 43. Влияние фазовых искажений на форму усиленного сигнала:
а — форма сигнала на входе, *б* — форма сигнала на выходе

на средней частоте. В отдельных случаях частотная характеристика имеет подъем в некоторой области частот (кривая *3*). Частотные искажения незаметны для человеческого уха, если на крайних частотах диапазона они не превышают 25—40%. Это соответствует изменению коэффициента усиления на 2—3 дБ.

Фазовые искажения являются результатом фазовых сдвигов, вносимых усилителем, для составляющих разных частот сложного сигнала. При усилении напряжения начальные фазы отдельных его составляющих изменяются из-за влияния реактивных элементов схемы. Как показано на рис. 43, *а*, *б*, в результате изменения началь-

ной фазы второй гармоники напряжений (кривая *2*) относнтельно первой гармонккн (кривая *1*) форма сигнала на выходе усилнтеля отличается от формы напряжения на его входе.

Если начальные фазы отдельных составляющих напряжения не изменяются, фазовые искажения отсутствуют. Фазовые искажения также отсутствуют, когда угол сдвнга фаз пропорционален частоте передаваемого сигнала. Действительно, если все составляющие напряжения сдвинуты по фазе пропорционально их частоте (вторая гармонкка сдвинута на угол, в два раза большнй, чем первая гармоника; третья гармоника — на угол, в трн раза больший, и т. д.), взаимное расположение составляющих напряження не меняется и поэтому не меняется форма результирующего напряжения.

В усилителях низкой частоты фазовые нскажения не нграют большой роли, так как ухо не реагирует на фазовые сдвнгн между отдельнымн составляющимн сложного сигнала. В усилнтелях телевнзионных сигналов фазовые нскажения нмеют большое значенне, так как они приводят к нскажению изображення. Большое значенне имеют фазовые искажeння и в нмпульсных усилителях.

Н е л и н е й н ы м н н с к а ж е н и я м и принято называть искажения формы усилнваемого снгнала, возникающие в усилнтелях из-за нелннейности характеристик электронных ламп, транзнсторов н трансформаторов. Рассмотрнм подробнее возннкновение нелинейных нскажений. На рис. 44,*а* показана анодно-сеточная характернстика лампы. На сетку подано постоянное отрицательное напряжение E_c (напряжение смещения) и переменное сннусоидальное напряжение (рис. 44,*б*). Пусть характеристнка лампы прямолинейна (прямая $A'PB$). Тогда ток в цепи анода будет иметь форму сннусондального колебания (пунктирная кривая на рис. 44,*в*). Но так как действнтельная характеристнка криволннейна, ток в цепи анода нсказится и будет иметь форму периоднческого несинусоидального колебання (сплошная кривая на рнс. 44,*в*).

Известно, что периоднческое несннусоидальное колебание может быть разложено в ряд сннусондальных колебаний — колебания основной частоты f, кратных ей частот $2f$, $3f$ и т. д., которые называются, соответственно, первой, второй, третьей н т. д. гармониками. Это показано на рнс. 44,*г*. Верхняя кривая нзображает периоднческое несинусондальное колебанне, а ннжние кривые — первую н вторую гармоники этого колебания. Если произвестн сложение ординат обеих гармоник (с учетом нх знаков), то получится верхний график. График анодного тока (рис. 44,*в*) имеет в своем составе кроме первой и второй гармоники более высоких порядков (третью, четвертую и т. д.), а также постоянную составляющую тока.

Для количественной оценки нелннейных нскажений пользуются коэффнцнентом нелннейных искажений (или коэффициентом гармонк)

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \cdots}}{I_1} \text{ нли } \gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots}}{U_1}, \qquad (16)$$

где I_1, I_2, I_3 (U_1, U_2, U_3) — токи и, соответственно, напряжения первой, второй и третьей гармоник.

Допустимые значения коэффициента нелинейных искажений зависят от назначения усилителя и полосы пропускаемых частот. В радиовещательных приемниках на частотах выше 400 Гц величина γ не должна превышать 5—10%, в радиотрансляционных узлах на частотах

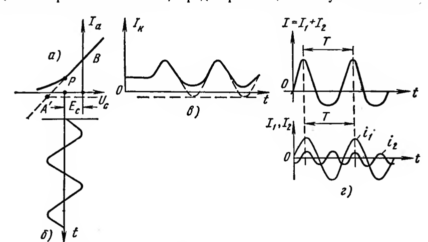


Рис. 44. Появление нелинейных искажений в электронной лампе: *а* — анодно-сеточная характеристика лампы, *б* — график напряжения на сетке, *в* — график анодного тока, *г* — разложение несинусоидального колебания в ряд синусоидальных колебаний

выше 100Гц — 2,5—4%, а в телевидении значения γ могут достигать 10—15%.

Прежде чем перейти к подробному рассмотрению усилительных устройств, познакомимся с типовыми способами включения и схемами цепей питания усилительных элементов.

§ 22. СХЕМЫ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

Схемы цепей питания электронной лампы

Схемы питания **цепей накала.** При использовании химических источников тока (гальванических элементов, аккумуляторов) чаще всего применяют лампы с катодами прямого накала. Наиболее распространенной является схема параллельного включения нитей накала (рис. 45, *а*). В установках проводной связи при питании от батарей 24 или 48 В применяют схему последовательного включения нитей накала (рис. 45, *б*). Для стабилизации режима цепи накала включен бареттер *Б*. Нити накала ламп с подогревным катодом преимущественно также включают параллельно, но, если источник питания имеет высокое напряжение, применяют схему последовательного включения их.

Схемы питаиия цепей аиодов и экраиирующих сеток. Цепн анодов всех ламп уснлителей обычно пнтают от общего нсточинка аиодиого пнтания, но это приводнт к паразнтной связи между каскадами. Переменная составляющая анодного тока, проходя через источннк питаиия, создает на его сопротивлеиии перемеиное падение напряження, которое подается на аноды другнх ламп. Это может привестн к нскажеиию характернстнк уснлнтелей н к генерацин собственых колебаиий.

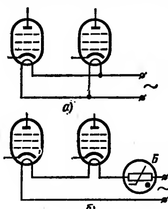


Рис. 45. Схемы включения нитей накала:
а — параллельное, б — последовательное

Чтобы этого нзбежать, в аиодиые цепи каскадов включают развязывающне фнльтры нз сопротивлення $R_ф$ и емкостн $C_ф$ (рис. 46,*а*). Величииы элементов фнльтра выбнрают такнми, чтобы для перемеиной составляющей аиодиого тока сопротивленне коидеисатора $C_ф$ было в 5—10 раз меньше сопротнвления $R_ф$. Тогда перемеиная составляющая анодиого тока будет замыкаться в анодной цепн через конденсатор $C_ф$ помимо анодного источинка $E_а$. $R_ф$ берут 0,1—1 МОм, а $C_ф$ — 0,1—1 мкФ. Питаине цепей экраиирующнх сеток обычио осуществляется от нсточника анодного пнтання. Еслн напряжеине на экранирующей сетке должио быть меиьше анодного напряжения, включают гасящее сопротнвлеине $R_э$ (рис. 46,*б*).

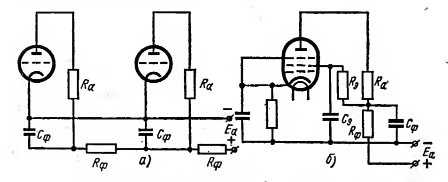


Рис. 46. Схемы питания цепей анодов (*а*) и экранирующих сеток (*б*)

Для иормальной работы уснлнтеля напряженне иа экраиирующей сетке должио быть неизменным. Но в рабочих условиях с нзменеиием напряжеиия на управляющей сетке ток в цепи экранирующей сеткн $I_э$ изменяется подобно аиодиому току. Это вызывает измененне падения напряжения иа сопротивлеинн $R_э$ и иапряжеиня на экранирующей сетке. Поэтому между экраинрующей сеткой н катодом включают бло-

кировочный конденсатор $C_э$. Емкость этого конденсатора выбирают большой (0,15—1 мкф), чтобы его сопротивление для переменной составляющей тока экранирующей сетки было небольшим. Тогда этот ток будет замыкаться в цепи экранирующей сетки через конденсатор $C_э$, помимо сопротивления $R_э$, и напряжение на экранирующей сетке остается неизменным.

Питание цепей управляющих сеток. В цепь сетки лампы включают источник усиливаемого напряжения и источник постоянного напряжения смещения. На рис. 47 показаны схемы подачи напряжения сигнала на сетку лампы: схема непосредственного включения источника между сеткой и катодом (рис. 47,*а*), схема трансформаторного включения (рис. 47,*б*) и схема резистивного включения источника (рис. 47,*в*).

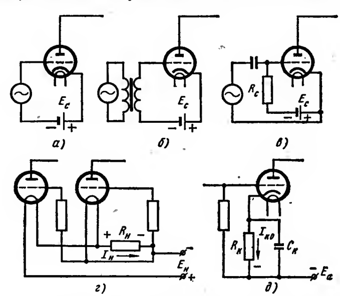


Рис. 47. Схемы питания цепей управляющих сеток:
а — непосредственное включение источника, *б* — трансформаторное включение, *в* — резистивное включение, *г* — подача напряжения смещения от цепи накала, *д* — катодное смещение

Постоянное напряжение смещения $E_с$ включается в цепь сетки для установки нужной рабочей точки на характеристике. В схемах, изображенных на рис. 47, *а*, *б*, *в*, отрицательное напряжение смещения подается от отдельного источника (выпрямителя или батареи). Но такой способ смещения применяется редко.

На рис. 47, *г* показана схема подачи напряжения смещения от цепи накала при питании от источника постоянного тока. Ток накала $I_н$, протекая через добавочное сопротивление $R_н$, создает на нем падение напряжения $E_с = I_н R_н$. Положительный полюс этого напряжения присоединен к катоду, а отрицательный — к сеткам ламп.

На рис. 47,*д* изображена схема катодного смещения, которую применяют для ламп с косвенным накалом. Постоянная составляющая катодного тока $I_{ко}$, проходя через резистор $R_к$, создает на нем падение напряжения $E_с = I_{ко}R_к$. Положительный полюс этого напряжения присоединен к катоду, а отрицательный — к сетке, т. е. сетка имеет отрицательный потенциал по отношению к катоду. Величина сопротивления $R_к$ может быть определена из равенства:

$$R_к = \frac{E_с}{I_{ко}}.$$

В рабочих условиях, когда на сетку подается переменное напряжение, начинает изменяться анодный ток. Чтобы переменная составляющая тока не протекала через резистор $R_к$, параллельно ему включают конденсатор $C_к$ большой емкости. Сопротивление этого конденсатора должно быть в 5—10 раз меньше сопротивления $R_к$ для наиболее низкой частоты переменной составляющей анодного тока.

Схемы цепей питания транзистора

Обычно питание цепей усилителя на транзисторах осуществляется от одного источника постоянного тока. Связь между каскадами через общий источник может сильно ухудшить показатели усилителя. Чтобы ослабить эту паразитную связь, в выходные цепи включают развязывающие фильтры $R_фC_ф$.

Подача напряжения смещения во входные цепи транзисторов. Нужный рабочий режим (рабочую точку) транзистора в усилительном каскаде устанавливают путем подачи на эмиттерный *p-n*-переход фиксированного смещения. У транзистора типа *p-n-p* напряжение на базе должно быть отрицательно относительно эмиттера, у транзистора типа *n-p-n* — положительно. Смещение во входные цепи транзистора подают от общего источника питания. Его можно осуществить фиксированным током или напряжением.

Способы подачи фиксированного смещения приведены на рис. 48. На рис. 48,*а* изображена схема усилителя с *ОЭ*, в которой на базу по-

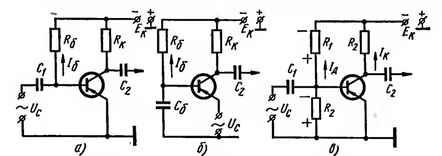


Рис. 48. Способы подачи фиксированного смещения:
а — фиксированным током базы в схеме с *ОЭ*, *б* — фиксированным током базы в схеме с *ОБ*, *в* — фиксированным напряжением в схеме с *ОЭ*

дается смещение фиксированным током базы. Напряжение источника $E_к$ приложено к делителю, состоящему из $R_б$ и сопротивления эмиттерного *p-n*-перехода $R_{вх}$. Так как сопротивление *p-n*-перехода при его прямом включении мало, то ток $I_б$ через резистор $R_б$ определяется как $I_б \approx \frac{E_к}{R_б}$.

Величину $I_б$ определяют по статическим характеристикам. Затем определяют $R_б$ для обеспечения тока $I_б$:

$$R_б \approx \frac{E_к}{I_б} = \frac{\beta E_к}{I_к},$$

где $\beta = \frac{I_к}{I_б}$ — статический коэффициент усиления в схеме с *ОЭ*.

На рис. 48,*б* изображена схема усилителя с *ОБ*. Смещение на эмиттер подается также фиксированным током $I_б$, протекающим через сопротивление $R_б$ и эмиттерный *p-n*-переход. Особенность этой схемы та, что база соединена с корпусом через емкость $C_б$. Для переменной составляющей тока $I_б$ база получает нулевой потенциал, так как сопротивление конденсатора очень мало $\left(\frac{1}{\omega C_б} \ll R_б\right)$.

На рис. 48,*в* показана схема усилителя с *ОЭ*, в которой смещение на базу подается фиксированным напряжением с помощью делителя R_1R_2, включенного в цепь источника $E_к$. Ток $I_д$, проходя через делитель, создает на резисторе R_2 падение напряжения, приложенное в прямом направлении к эмиттерному *p-n*-переходу.

Стабилизация рабочей точки в транзисторных каскадах. Известно, что при изменениях температуры параметры транзистора изменяются. Следовательно, изменяется положение рабочей точки на характеристике и нарушается нормальный режим работы схемы. Чтобы избежать этого, применяют схемы температурной стабилизации: коллекторной и эмиттерной.

В схеме коллекторной стабилизации рабочей точки (рис. 49,*а*) между коллектором и базой включают сопротивление $R_к$. Между плюсом и минусом батареи коллектора $E_к$ последовательно включены: сопротивление нагрузки $R_н$, сопротивление $R_к$ и входное сопротивление транзистора (сопротивление база — эмиттер). В цепи протекает ток, который обеспечивает начальное смещение между базой и эмиттером. При изменении температуры ток в этой цепи изменяется так, что режим работы остается почти неизменным.

Предположим, что при повышенной температуре ток в выходной цепи возрос. Но при этом возросло и падение напряжения на $R_н$, а напряжение на $R_к$ уменьшилось. Ток смещения также уменьшился, а это в свою очередь уменьшило ток в выходной цепи. Изменения режима работы почти не произошло.

Еще более высокую стабильность режима обеспечивает схема эмиттерной стабилизации (рис. 49,*б*). В цепь эмиттера включено стабилизирующее сопротивление $R_э$. Через него протекает

ток от источника питания и создает на нем падение напряжения, полярность которого указана на схеме. Из этой же схемы видно, что напряжение на сопротивлении R_3 во входной цепи оказывается включенным навстречу напряжению смещения, которое снимается с сопротивления R_2.

При повышении температуры ток в цепи коллектора возрастает, увеличивается напряжение на сопротивлении R_3, а напряжение меж-

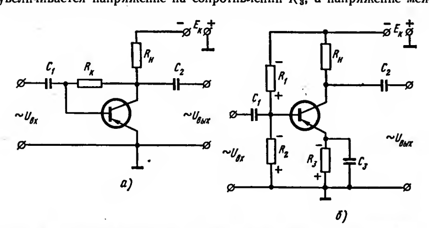


Рис. 49. Схемы стабилизации рабочей точки в транзисторных каскадах:
а — коллекторной, *б* — эмиттерной

ду базой и эмиттером уменьшается. Это уменьшает ток эмиттера, а следовательно, ток коллектора, что компенсирует первоначальное изменение режима. На сопротивлении R_3 создается пропорциональное току эмиттера переменное напряжение, которое уменьшает напряжение, снимаемое с делителя R_1R_2 и вместе с тем снижает коэффициент усиления каскада. Чтобы уменьшить переменное напряжение на сопротивлении R_3, параллельно включен конденсатор C_3 достаточно большой емкости.

§ 23. УСИЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Схемы усилителей напряжения на электронных лампах

По видам анодных нагрузок различают два основных типа усилителей напряжения низкой частоты: резистивный и трансформаторный.

Резистивный усилитель. Основными элементами схемы резистивного усилителя (рис. 50,*а*) являются: лампа *Л1*, сопротивление анодной нагрузки $R_а$, разделительный конденсатор $C_с$ и сопротивление утечки $R_с$. Конденсатор $C_с$ препятствует попаданию постоянного напряжения в цепь сетки лампы *Л2*. Сопротивление $R_с$ служит для подачи на управляющую сетку следующей лампы напряжения смещения и для стекания сеточных зарядов на катод. На вход каскада подается

усиливаемое напряжение $U_{вх}$, а с выхода сиимается усилеииое напряжеиие $U_{вых}$, которое подается иа вход следующего каскада.

Процессы, протекающие в резистивиом каскаде усилителя, изображеиы графически иа рис. 50,*б*, где показаиа статическая аиодио-

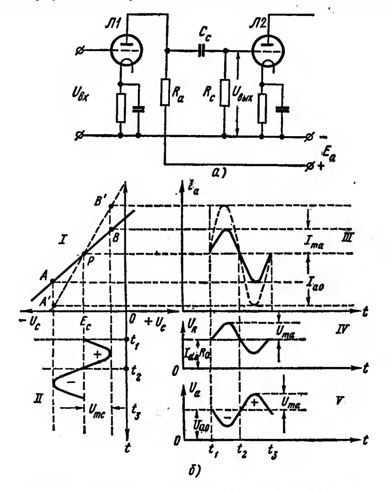


Рис. 50. Резистивиый усилитель напряжеиия иа лампах:
а — схема, *б* — рабочие процессы в усилителе

сеточиая характеристика триода (пунктириая кривая $A'PB'$ иа графике *I*), т. е. зависимость $I_а = \varphi(U_с)$ при $U_а =$ const и отсутствии аиодиой нагрузки.

При отсутствии перемеииого напряжеиия сигиала ($U_с = 0$) в цепи сетки действует только отрицательное напряжеиие $E_с$. Этому напряжеиию соответствует на динамической характеристике точка P, называемая *рабочей точкой*. Измеияя величииу напряжения $E_с$, можно

изменять положение рабочей точки на динамической характеристике. Если увеличить отрицательное напряжение, рабочая точка сместится влево, а если уменьшить — вправо. Поэтому напряжение $E_с$ называется *напряжением смещения*.

Положение рабочей точки определяет величину постоянного тока, который протекает в анодной цепи. Как видно из рисунка, напряжению $E_с$ соответствует ток $I_{а0}$, называемый *током покоя*. Этот ток создает на сопротивлении нагрузки постоянное падение напряжения $U_{а0}$, равное $I_{а0}R_а$. Напряжение на аноде меньше напряжения анодной батареи на величину $U_{а0}$:

$$U_а = E_а - I_{а0}R_а.$$

Пусть в некоторый момент времени t_1 в цепь сетки кроме напряжения смещения $E_с$ включили переменное напряжение сигнала с амплитудой $U_{mс}$. Для простоты будем считать, что переменное напряжение синусоидальное. Это напряжение показано на рисунке в виде временной диаграммы (график II). Ось времени направлена вниз, а ось напряжения расположена параллельно оси абсцисс анодно-сеточной характеристики триода.

Как видно из временной диаграммы, мгновенное напряжение на сетке изменяется: в положительный полупериод напряжения сигнала величина отрицательного напряжения на сетке уменьшается, в отрицательный полупериод — наоборот, возрастает. Но изменению напряжения на сетке соответствует изменение тока в цепи анода (график III). Если используемый участок характеристики (AB) прямолинейный, то синусоидальному изменению напряжения на сетке соответствует синусоидальное изменение анодного тока. Этот ток пульсирующий и состоит из постоянной составляющей $I_{а0}$ и переменной составляющей с амплитудой $I_{mа}$.

На графике IV показано напряжение на анодной нагрузке U_R, а на графике V — напряжение на аноде $U_а$. Амплитуда напряжения на аноде

$$U_{mа} = I_{mа}R_а.$$

Сравнение графиков V и II показывает, что увеличению напряжения на сетке (от t_1 до t_2) соответствует уменьшение напряжения на аноде, а уменьшению напряжения на сетке (от t_2 до t_3) — увеличение напряжения на аноде. Другими словами, в усилительном каскаде напряжения на сетке и аноде противоположны по фазе, т. е. сдвинуты на угол 180°.

Амплитуда переменного напряжения на выходе каскада $U_{mа}$ значительно больше амплитуды напряжения на его входе $U_{mс}$. Физически это объясняется усилительным свойством лампы, благодаря которому изменение напряжения на сетке оказывает бо́льшее влияние на величину анодного тока, чем изменение анодного напряжения. Чтобы свести к минимуму нелинейные искажения, рабочую точку устанавливают на прямолинейном участке динамической характеристики. Напряжение усиливаемого сигнала не должно быть большим, чтобы лам-

па работала в пределах прямолинейного участка ее динамической характеристики и без сеточных токов.

Достоинствами резистивного усилителя являются незначительные нелинейные и частотные искажения, малые размеры и стоимость; недостатком — то, что часть напряжения источника питания падает на нагрузочном сопротивлении R_a, и для получения необходимого анодного напряжения надо иметь высокое напряжение E_a.

В резистивных усилителях на триоде величину сопротивления анодной нагрузки R_a принимают равной $(3 \div 5)R_i$. Значение R_i берут из справочника. В зависимости от типа ламп величина R_a лежит в преде-

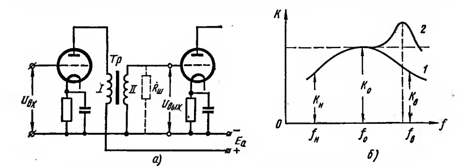


Рис. 51. Трансформаторный усилитель напряжения на лампах:
а — схема, *б* — частотная характеристика

лах 20—500 КОм. Величину сопротивления утечки определяют из соотношения $R_c = (2 \div 10)R_a$, но она не должна превышать 1—1,5 МОм. Разделительный конденсатор C_c имеет емкость 5000 — 10 000 пФ.

Если усилитель собран на пентоде с весьма большим внутренним сопротивлением ($R_i > 1$ МОм), величину R_a выбирают по допустимым частотным искажениям в области верхних частот. Чтобы шунтирующее действие емкости C_0 меньше сказывалось на верхних частотах, ее сопротивление должно быть больше сопротивления R_a, т. е. $\frac{1}{\Omega_в C_0} \gg R_a$. Практически величину R_a в усилителе на пентоде и лучевом тетроде берут равной приблизительно $(0,1 \div 0,2)\ R_i$.

Трансформаторный усилитель. На рис. 51, *а* показана схема трансформаторного усилителя на электронной лампе. В трансформаторном усилителе в качестве анодной нагрузки лампы служит трансформатор. Первичная обмотка включается между положительным полюсом анодной батареи и анодом лампы, вторичная — между сеткой и катодом следующей лампы. Здесь нет необходимости в разделительном конденсаторе, так как по постоянному току сеточная цепь лампы следующего каскада отделена от анодной цепи данного каскада. Нет необходимости и в сопротивлении утечки. Иногда параллельно вторичной обмотке трансформатора включают шунтирующее сопротивление $R_ш$ (показано на рисунке пунктиром). О назначении этого сопротивления скажем ниже.

Принцип действия трансформаторного усилителя заключается в том, что при подаче на сетку лампы переменного напряжения изменяется величина анодного тока. Переменная составляющая тока, проходя через первичную обмотку трансформатора, индуктирует во вторичной обмотке э. д. с. сигнала, которая подается на вход лампы следующего усилительного каскада (или на сопротивление нагрузки). Частотная характеристика усилителя изображена на рис. 51, *б*.

Трансформаторный усилитель имеет ряд преимуществ перед резистивным: коэффициент усиления его значительно больше, так как он определяется не только усилительным свойством лампы, но и величиной коэффициента трансформации *n*, который больше единицы; анодное напряжение почти равно напряжению анодного источника, так как активное сопротивление первичной обмотки очень мало; подъем частотной характеристики на верхней частоте может быть использован для компенсации частотных искажений в многокаскадном усилителе.

Но трансформаторный усилитель значительно сложнее и дороже резистивного, обладает неравномерной частотной характеристикой и вносит значительные нелинейные искажения. Кроме нелинейности характеристики лампы причиной нелинейных искажений является нелинейность кривой намагничивания стали сердечника трансформатора. Этим объясняется ограниченное применение трансформаторных усилителей в каскадах усиления напряжения.

В заключение коротко остановимся на особенностях конструкции трансформатора низкой частоты. Как мы видели, частотная характеристика трансформаторного усилителя значительно более неравномерна, чем резистивного. Чтобы уменьшить неравномерность, трансформатор должен обладать возможно большей индуктивностью первичной обмотки трансформатора и возможно меньшими индуктивностью рассеяния и межвитковой емкостью.

Для получения большой индуктивности первичной обмотки сердечник выполняют из ферромагнитного материала. Чтобы уменьшить индуктивность рассеяния и собственную межвитковую емкость, применяют секционированную обмотку. Секции разных обмоток чередуют для улучшения магнитной связи и уменьшения потоков рассеяния. В усилителях используют броневые и стержневые трансформаторы.

Схемы усилителей напряжения на транзисторах

По виду межкаскадной связи транзисторные каскады, как и ламповые, разделяют на резистивные и трансформаторные.

Резистивные усилители (рис. 52, *а*). В этих усилителях используется резистивно-емкостная связь между каскадами. Резистор R_2 служит для выделения усиленного напряжения, разделительный конденсатор C_2 преграждает путь постоянной составляющей напряжения из выходной цепи предыдущего каскада на вход следующего каскада. Частотная характеристика усилителя изображена на рис. 52,*б*.

Достоинствами усилителя являются простота, дешевизна схемы и хорошая частотная характеристика, недостатком — то, что в этой схеме не удается полностью согласовать выходное сопротивление каскада

с иизким входиым сопротивлеиием последующего. Это ие позволяет обеспечить большого усилеиия по мощиости.

Трансформаториые усилители. Траисформаториая связь обеспечивает согласоваиие высокого выходиого сопротивлеиия с иизким вход-

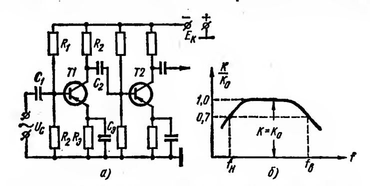


Рис. 52. Резистивный усилитель напряжения на транзисторах: а — схема, б — частотная характеристика

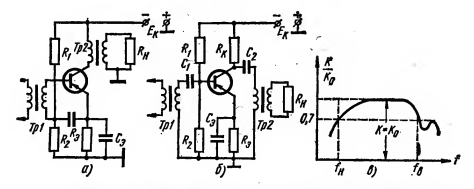


Рис. 53. Трансформаторный усилитель напряжения на транзисторах: а — с последовательным включением трансформатора, б — с параллельным включением трансформатора, в — частотная характеристика

иым сопротивлеиием. Такое согласоваиие при помощи поиижающего траисформатора будет рассмотреио иижe. На рис. 53, *а* показаиа схема усилительиого каскада с последовательиым включеиием траисформатора, а иа рис. 53, *б* — с параллельиым. В схеме с параллельиым включеиием имеются дополнительиые элементы — переходиый коидеисатор C_2 и резистор $R_к$. Наибольшее примеиеиие иаходит схема с последовательиым включеиием траисформатора.

Частотиая характеристика усилителя показаиа иа рис. 53, *в*. Сниже-иие усилеиия иа иижиих частотах обусловлеио умеиьшеиием реактивиого (иидуктивиого) сопротивлеиия первичной обмотки траисформатора. В области верхиих частот иа ход частотиой характеристики оказывают влияиие емкость коллекториого *p-n*-перехода $C_к$ траизистора и

индуктивность рассеяния трансформатора L_s. На некоторой частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_к}}$ происходит резонанс напряжений и возможен подъем характеристики.

§ 24. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилители мощности предназначены для отдачи во внешнюю нагрузку заданной мощности. Эта мощность должна отдаваться усилителем при минимальном потреблении мощности источников питания и допустимых частотных и нелинейных искажениях. Исходя из этого, выбирают тип лампы, режим ее работы, способ включения нагрузки и рабочую точку на характеристике.

Режим работы ламп в усилительных схемах. При рассмотрении процесса усиления в усилителе было показано, что, изменяя величину смещения в цепи сетки, можно изменять положение рабочей точки на характеристике. В зависимости от положения рабочей точки различают четыре режима работы лампы оконечного каскада: А, В, АВ и С.

В режиме А (рис. 54, *а*) ток протекает в анодной цепи в течение всего периода переменного напряжения на сетке. В этом режиме рабочую точку выбирают примерно в середине прямолинейного участка характеристики; амплитуда напряжения на сетке не должна превышать величину напряжения смещения. Это обеспечивает работу лампы без сеточных токов и минимальные нелинейные искажения.

Недостатком режима А является его низкий к. п. д. Мощность, потребляемая от источника анодного питания, велика, так как в анодной цепи протекает большой ток покоя. Полезная мощность мала, потому что амплитуда напряжения, подводимого к сетке, сравнительно небольшая и, следовательно, мала амплитуда колебаний в анодной цепи. Режим А применяют в маломощных усилителях, когда необходимо обеспечить минимальные нелинейные искажения, а величина к. п. д. не имеет значения.

В режиме В (рис. 54, *б*) ток в анодной цепи протекает примерно в течение половины периода переменного напряжения на сетке. Рабочую точку выбирают в начале характеристики путем увеличения напряжения смещения. Ток покоя равен нулю или очень мал. В результате этого уменьшается постоянная составляющая анодного тока и соответственно мощность, потребляемая от источника анодного питания.

Увеличение смещения позволяет увеличить амплитуду подводимого к сетке напряжения. Это вызывает увеличение амплитуды колебаний в анодной цепи и полезной мощности. К. п. д. усилителя в режиме В достигает 65—70%. Как показано на графике (рис. 54, *б*), ток протекает через лампу в течение первой половины периода. В течение второй половины периода ток через лампу не протекает, т. е. происходит отсечка тока. Половина времени прохождения тока через лампу, выра-

женная в угловых единицах, называется *углом отсечки тока* θ. В этом режиме θ равен 90°, или $\frac{\pi}{2}$.

Режим В имеет следующие недостатки: нелинейные искажения достигают 35—50%; лампа усиливает только один полупериод подводимого напряжения, так как в течение другого полупериода она заперта.

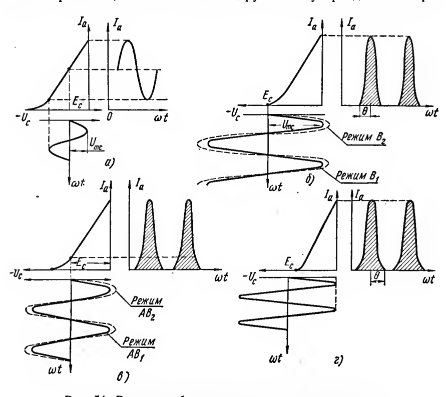


Рис. 54. Режимы работы лампы в усилительных схемах:
а — класс А, *б* — класс В, *в* — класс АВ, *г* — класс С

Этот режим применяют в двухтактных схемах усилителей, рассматриваемых ниже. Режим В подразделяют на режимы B_1 и B_2. В режиме B_1 лампа работает без сеточных токов, так как $U_{mc} \leq E_c$. В режиме B_2 лампа работает с сеточными токами; поскольку $U_{mc} \geq E_c$, на сетку в течение части периода подается положительное напряжение. Режим B_2 применяют в усилителях большой мощности.

Режим АВ (рис. 54, *в*) является промежуточным между режимами А и В. В этом режиме лампа работает с $\theta \approx 120$—130°. Рабочую точку выбирают на начальном участке динамической характеристики, но не в точке запирания лампы. Ток покоя I_{a0} мал, но не равен нулю. К. п. д. усилителя составляет 40—50%. Нелинейные искажения меньше, чем в режиме В. Режим класса АВ применяют в усилителях сред-

ней мощиости (десятки ватт). Его также подразделяют иа режимы AB_1 (без сеточиых токов) и AB_2 (с сеточиыми токами).

В режиме С (рис. 54, *г*) ток в аиодиой цепи лампы протекает меиьше половииы периода перемеииого иапряжеиия иа сетке и $\theta < 90°$. Для этого рабочую точку выбирают левее иачала аиодио-сеточиой характеристики. В режиме С к. п. д. выше, чем в режиме В, поскольку постояииая составляющая аиодиого тока и мощиость, потребляемая от источиика аиодиого питаиия меиьше. Режим С широко применяют в мощиых усилителях, иапример в радиопередающих устройствах, где аиодиой иагрузкой является резоиаисиый коитур, иастроеииый иа частоту входиого сигиала.

Способы включения нагрузки. Работа усилителя мощиости зависит от величииы и характера иагрузки. Нагрузкой усилителя мощиости большей частью является электродииамический громкоговоритель, звуковая катушка которого обладает комплексиым сопротивлеиием и имеет активиую и иидуктивиую составляющие. Но иа средией частоте приият учитывать только активиое сопротивлеиие катушки.

Для получения достаточиой мощиости иа выходе каскада с иаимеиьшими искажеииями иагрузочиое сопротивлеиие R_a должио быть согласовано с виутреииим сопротивлеиием R_i лампы окоиечиого каскада. При иеизмениой амплитуде иапряжеиия иа сетке лампа отдает максимальиую мощиость, когда $R_a = R_i$ или когда коэффициеит иагрузки

$$\alpha = \frac{R_a}{R_i} = 1.$$

Для триодов условие постояиства амплитуды иапряжеиия иа сетке ие представляет практического иитереса. Дело в том, что с увеличеиием R_a аиодио-сеточиая характеристика стаиовится более пологой и иелииейные искажеиия, виосимые лампой, умеиьшаются. Это позволяет использовать больший участок дииамической характеристики — увеличить сеточиое отрицательиое иапряжеиие и амплитуду перемеииого иапряжеиия иа сетке, ие заходя в область иижиего криволииейиого участка характеристики.

Практически устаиовлеио, что для усилеиия иа триоде, работающего в режиме А, целесообразио приият $\alpha = \frac{R_a}{R_i} = 3 \div 4$. Полезиая мощиость при этом умеиьшается по сравиеиию с максимальиой всего иа 5—10%, а иелииейиые искажеиия умеиьшаются зиачительио. Для пеитодов и лучевых тетродов величииу $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$ выбирают из условия иаимеиьших иелииейиых искажеиий, обычио $\alpha = 0{,}1$—$0{,}25$.

Для включеиия иагрузочиого сопротивлеиия в аиодиую цепь могут быть примеиеиы различиые схемы выхода усилителя — с иепосредствеииым включеиием иагрузки, с траисформаториым включеиием и др.

Схема с иепосредствеииым включеиием иагрузки (рис. 55, *а*) ие получила распростраиеиия из-за иевозможиости согласоваиия сопротивлеиия иагрузки с виутреииим сопротивлеиием лампы. Сопротивлеиие звуковой катушки громкоговорителя иамиого меиьше виутреииего сопротивлеиия лампы, и через иее прохо-

дит постоянная составляющая анодного тока. Кроме того, нагрузка находится под высоким постоянным напряжением относительно земли. Это создает опасность поражения током для обслуживающего персонала.

В схеме с трансформаторным включением нагрузки (рис. 55, в) устранены недостатки, присущие предыдущей схеме. Выходной трансформатор позволяет согласовать сопротив-

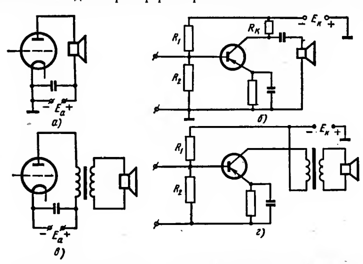


Рис. 55. Схемы выхода усилителя на электронной лампе и транзисторе:

а, б — с непосредственным включением нагрузки, в, г — с трансформаторным включением нагрузки

ление нагрузки с внутренним сопротивлением лампы. Из теории трансформаторов известно, что нагрузочное сопротивление $R_н$, присоединенное к вторичной обмотке трансформатора, пересчитывается в цепь первичной обмотки трансформатора по формуле

$$R_а = \frac{R_н}{n^2},$$

где n — коэффициент трансформации.

Определим величину n:

$$n = \sqrt{\frac{R_н}{R_а}}.$$

Пусть внутреннее сопротивление лампы $R_i = 2250$ Ом, а нагрузочное сопротивление (например, сопротивление звуковой катушки громкоговорителя) $R_н = 20$ Ом. Зададимся величиной $R_а$.

$$R_а = 2R_i = 4500 \text{ Ом, тогда } n = \sqrt{\frac{20}{4500}} = \sqrt{\frac{1}{225}} = \frac{1}{15},$$

т. е. $n < 1$.

Отсюда видно, что, применив понижающий трансформатор, можно согласовать низкоомную нагрузку со значительно бо́льшим внутренним сопротивлением лампы.

В схеме с трансформаторным включением нагрузки постоянная составляющая анодного тока не проходит через нагрузочное сопротивление. Так как падение напряжения на первичной обмотке трансформатора незначительно, то напряжение на аноде почти равно напряжению анодной батареи. Поэтому схема с трансформаторным включением нагрузки является основной схемой усилителя мощности.

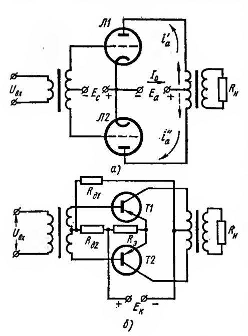


Рис. 56. Схемы двухтактных усилителей: *а* — на электронных лампах, *б* — на транзисторах

На рис. 55, *б* и *г* показаны аналогичные схемы включения нагрузки в выходную цепь транзистора.

Двухтактная схема усилителя мощности. Однотактные схемы применяют в усилителях, мощность которых не превышает 3—5 Вт. В каскадах усилителей большей мощности приходится использовать в одном каскаде не одну, а несколько ламп.

При параллельном соединении ламп в однотактной схеме увеличение мощности достигается увеличением тока в анодной цепи ламп. Вместе с переменной составляющей анодного тока возрастает его постоянная составляющая. Это вызывает дополнительные трудности в конструировании выходного трансформатора и может привести к возникновению дополнительных нелинейных искажений из-за нелинейности кривой намагничивания стали сердечника трансформатора. Поэтому наиболее распространенной схемой соединения ламп в одном каскаде является двухтактная схема (рис. 56, *а*). Схема состоит из двух одинаковых половин, называемых плечами. Если нужно получить мощность, большую, чем могут создать две лампы в двухтактной схеме, в каждое из плеч параллельно включают не одну, а две или три лампы.

Рассмотрим принцип действия двухтактной схемы. Вторичная обмотка входного трансформатора имеет вывод от средней точки, который соединяется с источником напряжения смещения. Крайние зажимы вторичной обмотки соединены с управляющими сетками ламп *Л1* и *Л2*. Первичная обмотка выходного трансформатора имеет вывод от

средней точки, который присоединяется к плюсу источника анодного питания; крайние зажимы соединяются с анодами этих ламп.

В режиме покоя, когда переменное напряжение не подается, каждая лампа потребляет от источника постоянные токи $I'_{a0} = I''_{a0} = I_{a0}$. В общей цепи (через источник E_a) протекает ток I_0, равный $2I_{a0}$. В первичной обмотке выходного трансформатора токи I'_{a0} и I''_{a0} имеют противоположные направления и создают в сердечнике трансформатора равные и противоположно направленные постоянные магнитные потоки. Результирующий постоянный магнитный поток равен нулю и поэтому отсутствует постоянное подмагничивание сердечника.

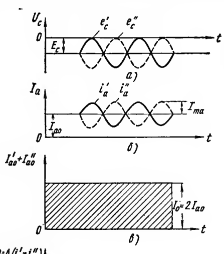


Рис. 57. Графики работы двухтактной схемы:

а — мгновенные значения напряжения на сетках ламп, *б* — изменения анодного тока, *в* — общий ток, потребляемый от источника, *г* — магнитный поток, создаваемый токами ламп

При подведении переменного напряжения на сетки ламп результирующие сеточные напряжения изменяются в противофазе. На графике, изображенном на рис. 57, *а*, показано изменение мгновенного значения напряжения на сетке первой лампы e'_c и на сетке второй лампы e''_c. На графике, изображенном на рис. 57, *б*, показаны соответствующие им изменения анодных токов ламп *Л1* и *Л2*.

Ток, потребляемый от источника питания, т. е. ток, протекающий в общем проводе анодного питания, равен сумме этих токов:

$$i_a = i'_a + i''_a.$$

Переменные составляющие токов i'_a и i''_a находятся в противофазе и в общем проводе взаимно уничтожают друг друга. Постоянные же составляющие токов складываются, поэтому общий ток, потребляемый от источника, равен удвоенному току покоя (рис. 57, *в*). Отсутствие в цепи анодного источника переменной составляющей анодного тока позволяет уменьшить паразитную связь, возникающую в многокаскадном усилителе через внутреннее сопротивление общего анодного источника питания.

Токи, протекающие через каждую из половин первичной обмотки, направлены относительно среднего вывода в противоположные стороны. Поэтому магнитный поток Ф, создаваемый токами обеих ламп,

$$\Phi = A\,(\,i_a' - i_a''),$$

где A — коэффициент пропорциональности (рис. 57, *г*).

Магнитный поток, определяемый постоянными составляющими анодного тока ламп *Л1* и *Л2*, равен нулю, а магнитный поток, определяемый переменными составляющими токов ламп, складывается, т. е. он в два раза больше магнитного потока, создаваемого током одной лампы. Следовательно, мощность в нагрузке равна сумме мощностей, развиваемых каждой лампой в отдельности.

Пусть рабочая точка выбрана на криволинейном участке анодно-сеточной характеристики (график *I* на рис. 58). Как показано на рисунке, кривые анодного тока ламп *Л1* и *Л2* (i'_a и i''_a) получаются несимметричными. В таких кривых преобладают четные (вторая, четвертая и т. д.) гармоники тока. Переменные напряжения на сетках ламп сдвинуты на 180° (график *II*). Соответственно сдвинуты по фазе токи i'_a и i''_a, протекающие через лампы (график *III*). Кроме того, эти токи, протекая через каждую из половин первичной обмотки трансформатора, направлены относительно среднего вывода в противоположные стороны. Поэтому при вычитании пульсирующих токов ламп их переменные составляющие складываются.

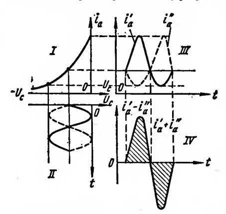


Рис. 58. Компенсация четных гармоник в двухтактном усилителе

Как показано на этом графике, менее искаженный полупериод одного тока складывается с более искаженным полупериодом другого тока. Результирующая кривая (график *IV*) получается симметричной, т. е. не содержит четных гармоник, и нелинейные искажения уменьшаются. Кроме того, симметричность схемы уменьшает влияние пульсаций питающих напряжений.

Таким образом, двухтактная схема обладает следующими преимуществами перед однотактной схемой:

компенсирует четные гармоники, что приводит к значительному уменьшению нелинейных искажений. Это позволяет применять в двухтактной схеме экономичные режимы В и АВ;

устраняет фон от пульсаций питающих напряжений;

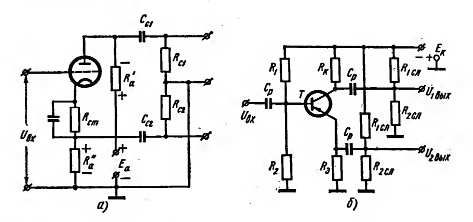
устраняет постоянное подмагничивание сердечника выходного трансформатора;

компенсирует переменную составляющую тока в цепи анодного источника и ослабляет паразитную связь между каскадами.

К недостаткам схемы двухтактного усилителя следует отнести большое количество ее деталей, необходимость применения не менее двух усилительных ламп и подачи на вход симметричного напряжения,

т. е. двух равиых по велнчнне и протнвоположиых по фазе иапряжеиий. Достониства схемы сохраияются лншь прн снмметрнн плеч. Это требует подбора ламп с однмаковымн параметрамн н снмметрнн двух половнн первнчной обмоткн выходиого траисформатора.

Двухтактиая схема уснлнтеля мощности на траизнсторах (см. рис. 56, *б*) обладает свойствамн, аналогичиымн схеме на электронных лампах. Транзисторы включеиы по схеме с общнм эмнттером. Постояниое напряженне между эмиттером н базой создается делнтелем напряжения $R_{д1}$, $R_{д2}$. В цепь эмнттера включено стабнлнзнрующее сопротнвленне $R_э$.



Рнс. 59. Фазоинверсные схемы с разделенной нагрузкой:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

В прнведенных двухтактных схемах уснлнтелей задача подачи иа сетки ламп *Л1* и *Л2* равных по велнчнне и противофазиых иапряжеиий решается путем использованя входного трансформатора. Вторнчная обмотка этого трансформатора должна нметь вывод от средней точкн. Но необходнмость прнмененмя трансформатора связана с удорожаннем установкн, увелнченнем ее массы н возрастанием частотных н фазовых искаженнй. Лучшне результаты дают схемы реостатио-емкостного типа, которые получнлн название фазоинверсных схем.

Фазоинверсные схемы. На рнс. 59, *а* показана фазоинверсная схема с разделенной анодной нагрузкой. Анодная нагрузка лампы резистнвного каскада разделена на две частн. Одна часть R'_a, равная $R_a/2$, включеиа между плюсом аноднои батарен и аиодом лампы, вторая часть R''_a, также равная $R_a/2$ — между мннусом анодной батареи н катодом. С каждого из сопротивлений снимают половнну уснленного напряження, которое через разделнтельные конденсаторы C_{c1} н C_{c2} н сопротивлеиия утечек R_{c1} н R_{c2} подают к сеткам ламп двухтактной схемы.

Как видно нз схемы, эти иапряжеиня имеют протнвоположные поляриости. Чтобы напряжеиия былн равнымн по велнчине, элементы

схемы должны быть равны:

$$R'_a = R''_a; \quad R_{c1} = R_{c2}; \quad C_{c1} = C_{c2}.$$

Достоинством схемы является ее простота и необходимость иметь всего одну лампу, основным недостатком — малый коэффициент усиления. Как видно из схемы, падение напряжения на сопротивлении R''_a прикладывается к сетке лампы *Л1* в противофазе с напряжением сигнала и уменьшает его. Кроме того, выходное напряжение составляет половину колебательного напряжения, развиваемого лампой в анодной цепи. Поэтому эту схему не применяют в усилителях сравнительно большой мощности, требующих от предоконечного каскада большого напряжения возбуждения.

Схема фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой на транзисторе показана на рис. 59,*б*, где $R_{1сл}$ и $R_{2сл}$ — сопротивления резисторов делителя в цепи базы следующего каскада.

§ 25. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратной связью называется подача напряжения с выхода усилителя на его вход. Обратная связь может быть вредной, возникающей в результате нежелательного влияния различных цепей усилителя друг на друга, и полезной, создаваемой путем включения в схему специальных элементов обратной связи. Обратная связь бывает положительной и отрицательной. Положительной она бывает тогда, когда приходящие с выхода на вход колебания совпадают по фазе с входными колебаниями, отрицательной — когда приходящие с выхода на вход колебания находятся в противофазе с входными колебаниями.

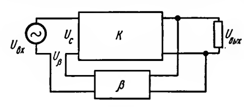


Рис. 60. Структурная схема усилителя с обратной связью по напряжению

Величина напряжения, подаваемого на вход усилителя через цепь обратной связи, может зависеть или от величины выходного напряжения, или от величины тока в нагрузке, или одновременно от выходного напряжения и тока в нагрузке. В соответствии с этим различают следующие схемы обратной связи: обратной связи по напряжению; обратной связи по току; со смешанной обратной связью.

Рассмотрим схемы обратной связи по напряжению и току. Структурная схема усилителя с обратной связью по напряжению показана на рис. 60. Напряжение, подаваемое с выхода на вход усилителя, называется *напряжением обратной связи* $U_β$. При положительной обратной связи напряжение между сеткой и катодом лампы

$$U_c = U_{вх} + U_β,$$

а при отрицательной обратной связн

$$U_c = U_{вх} - U_{\beta}.$$

Обозначим отношенне $\frac{U_{\beta}}{U_{вых}}$ через β н назовем его *коэффициентом обратной связи*. Коэффициент β показывает, какая часть выходного напряжения подается обратно на вход усилнтеля.

Обозначим также коэффнцнент уснлення каскада без обратной связи через K:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_c},$$

а коэффицнент усилення того же каскада с обратной связью через K_{β}:

$$K_{\beta} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

Для положительной обратной связн

$$U_{вх} = U_c - U_{\beta} \text{ и } K_{\beta\,пол} = \frac{U_{вых}}{U_c - U_{\beta}}.$$

Для отрнцательной обратной связи

$$U_{вх} = U_c + U_{\beta} \text{ и } K_{\beta\,отр} = \frac{U_{вых}}{U_c + U_{\beta}}.$$

Разделим числитель и знаменатель в этнх выражениях на U_c и заменим отношение $\frac{U_{вых}}{U_c}$ велнчнной K, тогда получнм

$$K_{\beta\,пол} = \frac{K}{1 - \beta K}. \quad (17)$$

$$K_{\beta\,отр} = \frac{K}{1 + \beta K}. \quad (18)$$

Этн формулы показывают, что коэффициент уснлення каскада прн положительной обратной связн возрастает, а при отрнцательной — уменьшается. Уменьшение K_{β} прн отрнцательной обратной связн объясняется тем, что напряженне обратной связи уменьшает напряжение на сетке. Она становнтся меньше напряження входного сигнала. Уменьшенне действующего на сетке лампы напряжения вызывает уменьшение напряжения на выходе н соответственно уменьшенне коэффициента уснлення каскада. Увелнченне K_{β} прн положительной обратной связн объясняется тем, что напряжение обратной связн, совпадая по фазе с сигналом, увеличивает напряженне на сетке лампы и вместе с тем увеличивает напряженне на выходе уснлнтеля.

Прн положительной обратной связи знаменатель формулы (17) может обратнться в нуль ($1 - \beta K = 0$), а $K_{\beta пол}$ — в бесконечность. Фнзнчески это означает, что ннчтожно малые случайные напряжения на входе лампы могут вызвать значнтельные напряжения на выходе. Усилитель в этом случае превращается в генератор паразитных коле-

баний. Равенство $\beta K = 1$ является условием самовозбуждения усилителя.

Отрицательная обратная связь уменьшает все виды искажений. При наличии нелинейных искажений в усилителе напряжения высших гармонических составляющих подаются с выхода на его вход. Эти напряжения находятся в противофазе с соответствующими гармоническими составляющими, создаваемыми усилителем, и частично компенсируют их.

Отрицательная обратная связь уменьшает частотные искажения и поэтому выравнивает частотную характеристику. Спад частотной ха-

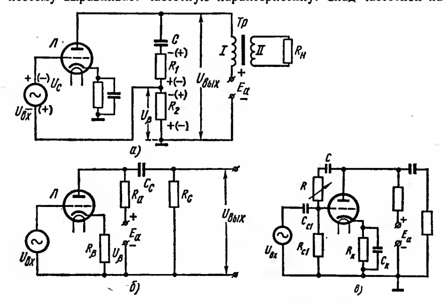


Рис. 61. Схемы отрицательной обратной связи:
а — по напряжению, *б* — по току, *в* — параллельной обратной связи

рактеристики на крайних частотах диапазона уменьшается в связи с тем, что с падением выходного напряжения уменьшается напряжение обратной связи, подводимое на вход усилителя. Подъем частотной характеристики на некоторых частотах вызывает увеличение выходного напряжения, а вместе с тем и напряжения обратной связи. В результате этого напряжение на входе уменьшается и снижается подъем характеристики.

Схемы отрицательной обратной связи. Принципиальная схема усилителя с обратной связью по напряжению показана на рис. 61, *а*. Напряжение обратной связи U_β снимается с сопротивления R_2 делителя напряжения CR_1R_2. Это напряжение действует навстречу входному напряжению, т. е. имеет место отрицательная обратная связь. Конденсатор C включен для того, чтобы напряжение обратной связи не содержало постоянной составляющей. Для сни-

жения частотных искажений сопротивление конденсатора должно быть для самых низких частот в 5—10 раз меньше $R_1 + R_2$.

Схема обратной связи по току изображена на рис. 61, *б*. Напряжение обратной связи U_β пропорционально току, протекающему через сопротивление смещения R_β. Если возросло напряжение на сетке, увеличивается анодный ток и U_β. Это напряжение подается к сетке лампы навстречу входному напряжению. Отрицательная обратная связь по току возникает в усилительной схеме, если сопротивление смещения в цепи катода не заблокировано емкостью достаточной величины.

В рассмотренных схемах напряжение обратной связи действует в цепи сетки последовательно с напряжением сигнала $U_{вх}$. Такая обратная связь называется *последовательной*.

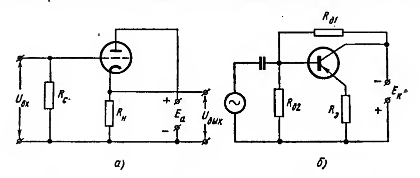


Рис. 62. Схемы катодного (*а*) и эмиттерного (*б*) повторителей

На рис. 61, *в* показана схема, в которой напряжение обратной связи подается параллельно напряжению входного сигнала. Цепочка из сопротивлений R, R_{c1} и конденсатора C подключена параллельно выходу каскада. Конденсатор C не пропускает постоянную составляющую напряжения. Напряжение обратной связи снимается с сопротивления R_{c1} и подается параллельно входному напряжению. Сопротивление R переменное. Если R уменьшить, напряжение обратной связи, снимаемое с R_{c1}, возрастает, но так как оно противофазно входному напряжению, напряжение на сетке уменьшается и снижается $U_{вх}$.

Примером схемы с отрицательной обратной связью является усилитель с катодной нагрузкой, называемой *катодным повторителем* (рис. 62, *а*). В этом каскаде напряжение, падающее на нагрузочном сопротивлении $R_н$, действует в цепи сетки в противофазе с входным напряжением.

Катодный повторитель обладает следующими особенностями:

если в обычном усилителе $R_н$ включено между анодом и плюсом анодной батареи, в данной схеме $R_н$ включает между катодом и минусом анодной батареи;

если в обычном усилителе общим электродом для цепей входа и выхода является катод, в данной схеме общим электродом является анод.

Для переменного тока сопротивление источника анодного питания очень мало, и анод оказывается подключенным к общему проводу. Поэтому усилитель с катодной нагрузкой называют *усилителем с общим* или *заземленным анодом*;

если в обычном усилителе происходит сдвиг фазы между выходным и входным напряжением на 180°, усилитель с катодной нагрузкой не поворачивает фазу сигнала. Действительно, пусть в данный момент напряжение сигнала, подводимое к сетке, увеличивается. При этом возрастает анодный ток и падение напряжения на $R_н$. Потенциал катода относительно общего провода возрастает, т. е. возрастает выходное напряжение; таким образом, напряжение на выходе совпадает по фазе с входным напряжением.

Как показано на схеме (рис. 62,*а*), выходное напряжение снимается с $R_н$. Это же напряжение действует в цепи сетки. Полярность напряжения такова, что она действует навстречу входному напряжению. В результате этого переменное напряжение на сетке, т. е. между сеткой и катодом, представляет собой разность между входным и выходным напряжениями. Поэтому выходное напряжение несколько меньше входного напряжения и коэффициент усиления меньше единицы. Таким образом, напряжение на выходе каскада с катодной нагрузкой как бы повторяет по величине и фазе входное напряжение, вследствие этого каскад называется катодным повторителем.

В катодном повторителе происходит усиление по току, а следовательно, усиление по мощности. Действительно, входное сопротивление лампы большое и примерно равно сопротивлению утечки $R_с$. Напряжение на входе $U_{вх} = I_{вх}R_с$. Напряжение на выходе $U_{вых} = I_{вых} R_н$.

Отсюда коэффициент усиления по току

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \cdot \frac{R_с}{R_н}.$$

Если принять примерно равными напряжения $U_{вых}$ и $U_{вх}$, то

$$K_i \approx \frac{R_с}{R_н}.$$

Но так как сопротивление $R_с \gg R_н$, то и K_i получится большим. Коэффициент усиления по мощности примерно равен коэффициенту усиления по току.

Катодный повторитель обладает большим входным и малым выходным сопротивлениями. Поэтому его применяют для согласования небольшого сопротивления нагрузки с большим выходным сопротивлением предыдущего каскада.

На практике также применяют схему на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором (рис. 62, *б*). Эта схема, называемая *эмиттерным повторителем*, аналогична по своим свойствам схеме катодного повторителя.

Паразитные положительные обратные связи в усилителях. Мы уже отмечали, что обратная связь бывает положительной и отрицательной. При положительной обратной связи колебания, проходящие с выхода на вход усилителя, совпадают по фазе с входными колебаниями. Но такая обратная связь в усилителях редко используется. Положительные обратные связи возникают через цепи, не предусмотренные схемой, и носят название *паразитных связей*. Эти связи приводят к появлению дополнительных искажений и могут явиться причиной генерации (самовозбуждения) усилителя. Причинами паразитных связей может быть связь анодных и сеточных цепей через междуэлектродную емкость сетка — анод лампы ($C_{а.\,с1}$), через общие источники анодного питания, магнитные и электрические поля.

С увеличением коэффициента усиления опасность самовозбуждения усилителя возрастает. Для уменьшения $C_{а.\,с1}$ применяют лампы с малыми междуэлектродными емкостями анод — сетка. Для ослабления связи через источники питания желательно применять источники с малым внутренним сопротивлением, раздельное питание каскадов от отдельных источников и развязывающие фильтры.

Причиной паразитной емкостной связи являются емкости между элементами схемы и монтажа анодных и сеточных цепей каскадов, входа и выхода усилителя, емкость между входом усилителя и посторонними источниками переменного тока и др. С целью уменьшения паразитной емкостной связи необходимо правильно размещать элементы схемы и провода. В некоторых случаях применяют электростатические экраны. Экран выполняют в виде проволочной оплетки, алюминиевой фольги и т. п. и присоединяют к корпусу усилителя. В экран помещают в первую очередь такие провода и элементы схемы, которые связаны с входом усилителя.

Причиной паразитной индуктивной связи являются индуктивные связи между входом усилителя и различными источниками переменного тока, создающими магнитные поля. Такие связи возникают главным образом при наличии входного трансформатора. Переменные магнитные поля выходных или питающих трансформаторов, пересекая витки обмоток входного трансформатора, наводят в них э. д.с. паразитной связи. При достаточном усилении эта э. д. с. может быть причиной генерации усилителя. Для уменьшения паразитной индуктивной связи входной трансформатор помещают в экран, выполненный из металла или сплава, обладающего малым удельным сопротивлением (медь или латунь).

Принцип действия экрана заключается в том, что переменное магнитное поле трансформатора, пересекая экран, индуктирует в нем вихревые токи. Эти токи в свою очередь создают магнитное поле противоположного направления. Поэтому результирующее магнитное поле, которое выходит за пределы экрана, значительно уменьшается. Для уменьшения паразитной связи между трансформаторами усилителя катушки располагают так, чтобы их оси были взаимно перпендикулярны. Уменьшение индуктивных связей может быть также достигнуто путем рационального монтажа схемы.

Контрольные вопросы

1. Как определить коэффициент усиления многокаскадного усилителя K, если известны коэффициенты усиления всех его каскадов K_1, K_2, K_3, ..., K_n?

2. Что такое частотные искажения и как они влияют на качество звучания?

3. Почему лампа вносит нелинейные искажения?

4. Каково назначение отрицательного смещения в усилительном каскаде?

5. Объясните причину неравномерности частотной характеристики резистивного усилителя.

6. Чем объясняется подъем частотной характеристики в трансформаторном усилителе?

7. В чем заключаются особенности режимов А, B, AB, C? Каковы их достоинства и недостатки?

8. Объясните принцип действия двухтактной схемы.

9. Для чего применяют фазоинверсные схемы усилителей?

10. Что такое отрицательная обратная связь и как она влияет на искажения в усилителе?

11. Объясните принцип действия схемы усилителя с обратной связью по напряжению и по току.

Глава V
КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

§ 26. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Колебательная система является неотъемлемой частью любого радиотехнического устройства. В радиопередатчиках эти системы дают возможность получать токи высокой частоты, необходимые для излучения радиоволн в пространство; в радиоприемниках они обеспечивают выделение необходимого спектра частот и позволяют значительно усилить колебания.

В качестве колебательных систем используют колебательные контуры, в которых индуктивность, емкость и сопротивление сосредоточены в определенных участках цепи. Такие системы, называемые *системами с сосредоточенными постоянными*, применяют на всех радиочастотах, кроме сверхвысоких. На сверхвысоких частотах используют системы, в которых индуктивность, емкость и сопротивление распределены вдоль всей цепи, т. е. *системы с распределенными постоянными*. К ним относят отрезки линий, объемные резонаторы.

Рассмотрим системы с сосредоточенными постоянными. Колебательным контуром является замкнутая электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности L, конденсатора C и резистора с активным сопротивлением R. Сопротивление обусловлено потерями энергии на выделение тепла в проводах контура (главным образом, катушки), потерями в диэлектрике конденсатора, в каркасе катушки и т. д.

Рассмотрим процессы, происходящие в схеме, показанной на рис. 63, *а*. При установке переключателя *П* в положение *1* конденсатор C зарядится до напряжения батареи U_m. При этом в электрическом поле, образованном между пластинами конденсатора, будет запасена энергия

$$W_э = \frac{CU_m^2}{2}. \qquad (19)$$

Затем переведем переключатель в положение *2*, т. е. образуем замкнутый колебательный контур. Конденсатор начинает разряжаться; через катушку течет ток, который создает вокруг ее витков магнитное поле. Энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, уменьшается и превращается в энергию магнитного поля катушки. Но процесс разряда конденсатора происходит не мгновенно, а постепенно, потому что быстрому увеличению тока разряда препятствует э. д. с. самоиндукции катушки, образующаяся при нарастании магнитного поля. Лишь через некоторое время конденсатор разрядится полностью.

Если активные потери в контуре отсутствуют ($R = 0$), т. е. имеется идеальный контур, вся энергия электрического поля конденсатора перейдет в энергию магнитного поля катушки:

$$W_м = \frac{LI_m^2}{2}. \qquad (20)$$

Для этого случая справедливо равенство $W_м = W_э$ или

$$\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}. \qquad (21)$$

Характер изменения напряжения U на конденсаторе и тока i в контуре без потерь показан на рис. 63, *б*. Описанный нами процесс раз-

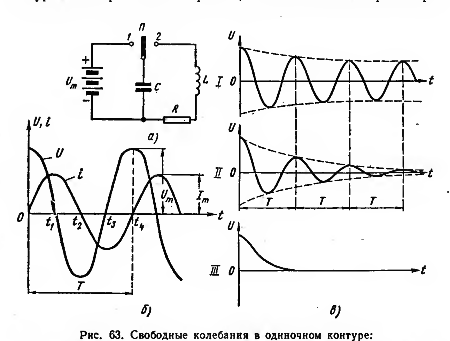


Рис. 63. Свободные колебания в одиночном контуре:

а — схема для возбуждения колебаний, *б* — характер изменения напряжения на конденсаторе и тока в контуре без потерь, *в* — характер изменения напряжения на конденсаторе при затухающих колебаниях (*I* — при большой добротности, *II* — при малой добротности, *III* — при апериодическом разряде)

ряда конденсатора и увеличения тока разряда показан на отрезке 0 — t_1. В момент t_1 напряжение на конденсаторе равно нулю, а ток достиг максимального значения. С момента t_1 ток в контуре начинает убывать, но направление его остается прежним. Конденсатор начинает заряжаться, на его обкладках возникает напряжение с противоположной полярностью. Как и в предыдущем случае, этот процесс происходит не мгновенно, а постепенно, так как э. д. с. самоиндукции препятствует быстрому уменьшению тока.

К моменту t_2 ток будет равен нулю, а напряжение на конденсаторе достигнет максимального значения. Вся энергия магнитного поля катушки перейдет в энергию электрического поля конденсатора. С момента t_2 начинается разряд конденсатора, а ток, протекающий в противоположном направлении, возрастает. К моменту t_3 конденсатор полностью разрядится, а ток достигнет максимального значения. На отрезке t_3 —

t_4 происходит заряд конденсатора и соответственно уменьшение тока. В момент t_4 восстанавливается исходное состояние и этим завершается полный цикл колебания. Далее процесс повторяется.

Таким образом, в цепи, состоящей из катушки индуктивности L и конденсатора C, происходит периодический колебательный процесс перехода энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки, и обратно. Конденсатор и катушка индуктивности являются как бы «резервуарами» или «накопителями» энергии электрического и магнитного полей.

Колебания, происходящие в контуре при отсутствии в нем источника переменной э. д. с., называются *свободными.* Из равенства (21) нетрудно получить формулу для определения f_0 — частоты свободных электрических колебаний. Так как в контуре происходят гармонические колебания с частотой f_0, то амплитуда тока в контуре

$$I_m = \frac{U_m}{1/\omega_0 C} = U_m \omega_0 C. \qquad (22)$$

Заменив в равенстве (21) I_m его значением, получим

$$CU_m^2 = LU_m^2 \omega_0^2 C^2,$$

откуда круговая частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Частота колебаний

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \qquad (23)$$

Время, в течение которого совершается одно полное колебание напряжения на конденсаторе и тока в контуре, называется *периодом колебания* T. Период — величина, обратная частоте:

$$T = \frac{1}{f_0} = 2\pi \sqrt{LC}. \qquad (24)$$

Амплитуду тока I_m свободных колебаний можно определить из равенства (22):

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U_m}{\rho},$$

где ρ — волновое, или характеристическое, сопротивление контура.

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Выше мы предположили, что активные потери в контуре отсутствуют, т. е. приняли R равным нулю. В реальном контуре имеются потери энергии на активном сопротивлении, поэтому количество энергии с

каждым колебанием в контуре убывает. Амплитуды напряжения на конденсаторе и тока в контуре постепенно уменьшаются, т. е. в контуре имеются затухающие колебания (рис. 63, *в*, *I* и *II*).

Убывание амплитуд напряжения и тока происходит по *экспоненциальному закону*. Чем больше величина потерь в контуре, тем быстрей убывают амплитуды напряжения и тока. Количественно скорость убывания амплитуд свободных колебаний определяется затуханием контура d:

$$d = \frac{R}{\rho} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}. \tag{25}$$

Величина, обратная затуханию, называется *добротностью контура*:

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}. \tag{26}$$

В контурах хорошего качества добротность $Q = 100 \div 200$ и больше, в контурах среднего качества — нескольким десяткам. Чем ниже добротность, тем быстрее убывают амплитуды свободных колебаний. В контурах с малой добротностью колебательный процесс может закончиться после небольшого числа колебаний. При дальнейшем уменьшении добротности (или увеличении активного сопротивления) процесс периодических свободных колебаний может совсем прекратиться (рис. 63 *в*, *III*). Это происходит при выполнении неравенства

$$R \geqslant 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Такая цепь называется *апериодической*.

Мы видели, что в реальном контуре имеет место свободный затухающий процесс. Чтобы получить незатухающие колебания, колебательный контур необходимо питать от источника переменной э. д. с. Колебания в контуре под действием внешней э. д. с. называются *вынужденными*. Источник переменной э. д. с. можно соединить с элементами контура L и C последовательно и параллельно. В соответствии с этим различают последовательный и параллельный контуры.

§ 27. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Рассмотрим процесс вынужденных колебаний в последовательном контуре (рис. 64,*а*). Последовательно с элементами контура L, C и R включен источник переменной э. д. с. E, частота которой f. Под действием переменной э. д. с. в цепи протекает переменный ток, амплитуду которого обозначим через I_m. Этот ток на своем пути встречает сопротивление z, которое можно определить по формуле:

$$z = \sqrt{R^2 + x^2},$$

где R — активное сопротивление контура; x — полное реактивное сопротивление контура.

$$x = x_L - x_C$$

где $x_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление, возрастающее с увеличением частоты: $x_c = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление, уменьшающееся с увеличением частоты; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

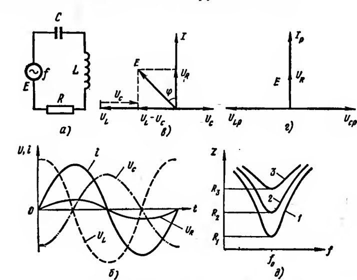


Рис. 64. Последовательный контур:

а — схема, *б* — кривые изменения напряжения и тока, *в—г*— векторные диаграммы, *д* — зависимость сопротивления последовательного контура от частоты

Отсюда полное сопротивление контура

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Ток в контуре

$$I_m = \frac{E}{z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (27)$$

Выражение (27) называется *уравнением резонансной кривой тока.*

Ток I_m, протекая в контуре, создает на каждом из его элементов напряжения, амплитуды которых соответственно равны:

$$U_{mL} = I_m \omega L; \quad U_{mC} = I_m \frac{1}{\omega C} \quad U_{mR} = I_m R.$$

Разделив обе части этих равенств на $\sqrt{2}$, получим действующие значения напряжения и тока

$$U_L = I\omega L, \quad U_C = I\,\frac{1}{\omega C}, \quad U_R = IR.$$

Согласно закону Кирхгофа сумма мгновенных значений этих напряжений в каждый момент времени равна э. д. с. источника. Характер изменения со временем мгновенных значений напряжений на индуктивном, емкостном и активном сопротивлениях, а также изменения тока показаны на рис. 64, *б*. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, напряжения на индуктивности опережает ток на 90°, напряжение на емкости отстает от тока на 90°. Эти напряжения противоположно направлены одно по отношению к другому, т. е. сдвинуты по фазе на 180°. Когда напряжения на индуктивности и емкости достигают максимального значения, ток и напряжение на активном сопротивлении равны нулю.

На векторной диаграмме последовательного контура (рис. 64, *в*) напряжения и ток изображены в виде векторов. Вектор тока I отложен вверх. Вектор напряжения U_R на активном сопротивлении, совпадающий по фазе с током, также отложен вверх. Вектор напряжения на индуктивности U_L, опережающий ток на 90°, отложен влево, а вектор напряжения на емкости U_c, отстающий от тока на 90°, отложен вправо. Вектор напряжения источника E, равный геометрической сумме векторов U_L, U_c и U_R, повернут относительно тока на некоторый угол φ.

Резонанс напряжений. Индуктивное и емкостное сопротивления изменяются с изменением частоты. Предположим, что изменяем частоту генератора ω. При этом оставляем неизменными э. д. с. источника E и значения элементов контура L, C и R. На некоторой частоте ω, равной ω_0, реактивное сопротивление контура x оказывается равным нулю:

$$x = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0.$$

Сопротивление контура z при этом имеет наименьшее значение и равно активному сопротивлению R, а ток имеет максимальное значение:

$$I_{mp} = \frac{E}{R}. \qquad (28)$$

Явление, при котором сопротивление контура становится чисто активным, называется *резонансом*, а равенство

$$x = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0,$$

или

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \qquad (29)$$

называется *условием резонанса*.

Из равенства (29) найдем частоту резонанса контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Как видим, частота резонанса контура f_0 равна частоте собственных колебаний в контуре (см. формулу 23). Это указывает на то, что резонанс в последовательном контуре наступает при равенстве частоты э. д. с. источника частоте собственных колебаний контура.

Из равенства (29) следует, что при резонансе напряжения на индуктивности и емкости равны между собой.

Так как

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad \text{то} \quad I_p\omega_0 L = I_p \cdot \frac{1}{\omega_0 C},$$

или

$$U_{Lp} = U_{Cp}.$$

Поскольку U_{Lp} и U_{Cp} сдвинуты друг относительно друга на 180°, сумма этих напряжений равна нулю и падение напряжения U_R на активном сопротивлении равно э. д. с. источника E.

Но напряжения на каждом из реактивных элементов при резонансе могут быть во много раз больше э. д. с. источника. Действительно, отношение индуктивного и емкостного напряжений к э. д. с. источника

$$\frac{U_L}{E} = \frac{I_p\omega_0 L}{I_p R} = \frac{\omega_0 L}{R} = Q; \quad \frac{U_C}{E} = \frac{I_p \cdot \frac{1}{\omega_0 C}}{I_p R} = \frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{R} = Q. \qquad (30)$$

При резонансе в последовательном контуре напряжение на каждом из реактивных элементов больше в Q раз э. д. с. источника. Поэтому резонанс в последовательном контуре называется *резонансом напряжений*. Резонанс напряжений используется, например, для получения на входе приемника напряжения, значительно превышающего э. д. с. в антенне.

Векторная диаграмма последовательного контура для случая резонанса показана на рис. 64, *г*. Векторы напряжения U_{Lp} и U_{Cp} равны по величине и противоположны по направлению, а вектор напряжения источника E, равный вектору напряжения U_R на активном сопротивлении, совпадает по фазе с вектором тока I_p. Таким образом, при резонансе ток в контуре совпадает по фазе с э. д. с. источника.

Сопротивление контура. Сопротивления реактивных элементов контура зависят от частоты. Как было указано, на частоте резонанса индуктивное и емкостное сопротивления равны, и сопротивление контура имеет минимальное значение.

Пусть частота э. д. с. источника ниже частоты резонанса ($\omega < \omega_0$). При уменьшении частоты сопротивление конденсатора растет, а сопротивление катушки индуктивности уменьшается. Следовательно, для

частот, меньших резонансной частоты, справедливо неравенство:

$$\omega L < \frac{1}{\omega C}.$$

Пусть, наоборот, частота э. д. с. источника выше частоты резонанса. При увеличении частоты возрастает индуктивное сопротивление, а уменьшается емкостное. На рис. 64, *д* показана зависимость сопротивления контура от частоты при различных значениях активного сопротивления контура. Значения z при резонансной частоте f_0 равны значениям активных сопротивлений R_1, R_2, R_3, при этом $R_3 > R_2 > R_1$. Из рисунка видно, что чем больше активное сопротивление, тем кривая сопротивления более пологая.

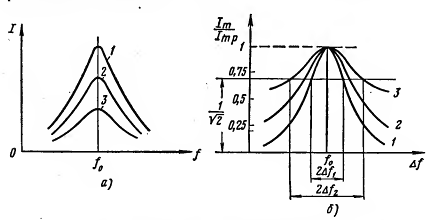


Рис. 65. Резонансные кривые последовательного контура:
а — абсолютных единицах, *б* — приведенные

Резонансные кривые последовательного контура. Как видно из уравнения резонансной кривой (27), ток в контуре, как и сопротивление, зависит от частоты. На рис. 65, *а* изображены кривые *1*, *2* и *3* зависимости анодного тока от частоты соответственно для трех значений сопротивления $R_1 < R_2 < R_3$, называемые *резонансными кривыми последовательного контура*. Они обратны кривым сопротивления, поскольку ток при неизменной э. д. с. обратно пропорционален сопротивлению контура. Сравнение резонансных кривых показывает, что чем больше активное сопротивление контура, тем меньше величина тока при резонансе и кривая более полога.

Чаще пользуются резонансными кривыми, в которых по осям координат отложены не абсолютные значения частоты и тока, а относительные величины: по оси абсцисс — отношение частоты источника к резонансной частоте контура, а по оси ординат — отношение тока к его значению при резонансе. Уравнение резонансной кривой, построенной в этой системе координат, имеет вид

$$\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 y^2}}. \qquad (31)$$

Эта формула называется *уравнением приведенной резонансной кривой*.

Величина

$$y = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \approx 2\ \frac{\Delta f}{f_0} \qquad (32)$$

называется *относительной расстройкой контура*; разность между частотой источника и резонансной частотой контура $\Delta f = f - f_0$ называется *абсолютной расстройкой контура*.

На рис. 65, *б* показаны приведенные резонансные кривые. Как видно из рисунка, вершины у кривых совпадают. Форма кривой зависит от добротности контура: чем больше добротность, тем острее резонансная кривая. По оси абсцисс отложена абсолютная расстройка Δf. Но часто откладывают по этой оси относительную расстройку y. При резонансной частоте f, равной f_0,

$$\Delta f = 0 \quad \text{и} \quad y = \frac{2\Delta f}{f_0} = 0.$$

Чем больше отличается частота источника f от резонансной частоты f_0, тем больше Δf и больше y.

Резонансная кривая показывает, что подведенная к контуру э. д. с. может создать в нем относительно большой ток только при частотах, близких к резонансной частоте контура. Другими словами, контур «пропускает» только колебания, близкие по частоте к резонансной. А колебания, сильно отличающиеся по частоте от резонансной частоты, контур не пропускает.

Полоса пропускания. Полосой пропускания $П$ называется спектр частот, в пределах которого токи в контуре отличаются от своего резонансного значения не более чем в $\sqrt{2}$ раз. Значение полосы пропускания можно легко найти из уравнения резонансной кривой (31).

Приравняв $\frac{I_m}{I_{mp}}$ и $\frac{1}{\sqrt{2}}$, имеем

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (Qy)^2}}, \quad \text{откуда} \quad Qy = Q \cdot \frac{2\Delta f}{f_0} = 1,$$

а полоса пропускания

$$П = 2\Delta f = \frac{f_0}{Q} = f_0 d. \qquad (33)$$

Формула (33) показывает, что чем больше добротность Q (или меньше затухание d), тем у́же полоса пропускания. Полосу пропускания контура можно определить графически (рис. 65, *б*), если провести на резонансной кривой горизонтальную линию на уровне

$$\frac{I}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707.$$

§ 28. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Рассмотрим процесс вынужденных колебаний в контуре, в котором источник переменной э. д. с. E подключен параллельно элементам контура (рис. 66, a). Для простоты предположим, что активное сопротивление имеется только в индуктивной ветви контура.

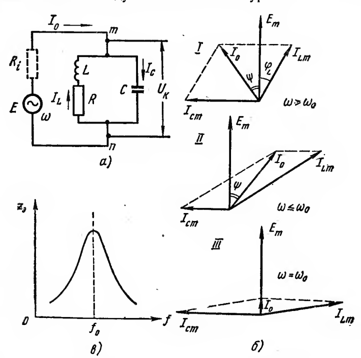


Рис. 66. Параллельный контур:

a — схема, $б$ — векторные диаграммы (I — для $\omega > \omega_0$, II—для $\omega = \omega_0$, III — для $\omega < \omega_0$), $в$ — зависимость эквивалентного сопротивления параллельного контура от частоты

Эквивалентное сопротивление контура между точками m и n:

$$z_э = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2},$$

где z_1 и z_2 — сопротивления левой и правой ветвей контура.

Согласно закону Ома ток в общей цепи $I_0 = \frac{E_m}{z_э}$.

Так же можно определить величины токов в емкостной и индуктивной ветвях. Так как обе ветви контура находятся под одним и тем же напряжением с амплитудой E_m, то каждый из токов может быть определен как:

$$I_{Cm} = \frac{E_m}{\frac{1}{\omega C}} \quad \text{и} \quad I_{Lm} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \tag{34}$$

Как видно, величины этих токов зависят от параметров контура (R, C и L), амплитуды E_m и частоты ω э. д. с. генератора. Если, например, увеличивать частоту ω, величина I_{Cm} возрастает, а величина I_{Lm} уменьшается, и наоборот.

По примеру последовательного контура начертим векторную диаграмму параллельного контура (рис. 66, *б*). Вектор э. д. с. E_m отложим вверх, вектор тока емкостной ветви L_{Cm}, опережающий напряжение источника на 90°, отложим влево; вектор тока в ветви с катушкой L и сопротивлением $R(I_{Lm})$ отстает от этого напряжения на некоторый угол φ_L. Вектор тока в общей цепи I_0 представляет собой геометрическую сумму векторов I_{Cm} и I_{Lm}. Вектор тока I_0 опережает напряжение на угол ψ (рис. 66, *б*, *I*) или отстает от него по фазе (рис. 66, *б*, *II*).

Резонанс токов. В параллельном контуре, как и в последовательном, наблюдается явление резонанса при $\omega = \omega_0$. Приближенным условием резонанса является равенство $\omega_0 L \approx \frac{1}{\omega_0 C}$.

При резонансе ток в общей цепи I_0 совпадает по фазе с напряжением генератора E_m и эквивалентное сопротивление контура является чисто активным. Величину этого сопротивления можно подсчитать по любой из формул

$$R_э = \frac{L}{CR} = \frac{\rho^2}{R} = RQ^2 = \rho Q. \qquad (35)$$

Векторная диаграмма для случая резонанса показана на рис. 66, *б*, *III*.

Так как при резонансе $\omega_0 L \approx \frac{1}{\omega_0 C}$ и в реальном контуре активное сопротивление индуктивной ветви намного меньше ее индуктивного сопротивления ($r \ll \omega_0 L$), токи в ветвях согласно равенству (34) почти равны между собой: $I_{Cm} \approx I_{Lm}$. Отсюда следует, что при резонансе ток в общей цепи, равный разности токов в ветвях ($I_0 = I_{Cm} - I_{Lm}$), имеет минимальное значение. Соответственно сопротивление контура при резонансе имеет максимальное значение.

Найдем соотношение между токами в ветвях контура и током в общей цепи при резонансе:

ток в общей цепи

$$I_{0р} = \frac{E_m}{R_э} = \frac{E_m}{\rho^2/R};$$

ток в емкостной ветви

$$I_{Cm} = \frac{E_m}{\frac{1}{\omega_0 C}} = \frac{E_m}{\rho};$$

ток в индуктивной ветви

$$I_{Lm} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}} \approx \frac{E_m}{\omega_0 L} = \frac{E_m}{\rho},$$

так как $\omega_0 L \gg R$.

Отношенне токов в ветвях к току в общей цепи

$$\frac{I_{Lm}}{I_{op}} \approx \frac{I_{Cm}}{I_{op}} = \frac{E_m}{\rho} : \frac{E_m}{\rho^2/R} = \frac{\rho}{R} = Q. \qquad (36)$$

Такнм образом, при резонансе в параллельном контуре ток в каждой нз его ветвей прнмерно в Q раз больше тока в общей цепн. Поэтому резонанс в параллельном контуре называется *резонансом токов.*

Эквнвалентное сопротнвление контура при резонансе является чисто актнвным и нмеет макснмальное значенне. При отходе от резонансной частоты ($\omega \neq \omega_0$) эквивалентное сопротивление контура перестает быть чисто актнвным и уменьшается по своему абсолютному значению. Действнтельно, еслн уменьшнть частоту э. д. с. генератора ($\omega < \omega_0$), ток в нндуктивной ветвн будет больше тока в емкостной ветви. В этом случае на векторной днаграмме (рнс. 66,*б*, *II*) ток в общей цепн I_0 будет больше, чем в случае резонанса, и отстанет по фазе от напряження E_m. Это указывает на то, что эквнвалентное сопротивленне контура уменьшнлось по абсолютной велнчине и прнобрело индуктивноактивный характер.

Увеличнм частоту э. д. с. генератора ($\omega > \omega_0$). Этому случаю соответствует векторная днаграмма, рассмотренная вначале (рнс. 66,*б*, *I*). Здесь ток в общей цепн I_0 также больше, чем в случае резонанса, но он опережает по фазе напряжение E_m. Это указывает на то, что эквивалентное сопротнвление контура уменьшилось по абсолютной величнне н приобрело емкостно-активный характер. Завнсимость абсолютной величины эквивалентного сопротивления параллельного контура $z_э$ от частоты f э. д. с. генератора показана на рнс. 66,*в*.

Резонансные кривые параллельного контура. До сих пор мы не учитывали внутреннее сопротнвленне нсточика э. д. с. , велнчина которого снльно влняет на резонансные свойства цепи, содержащей источннк э. д. с. н параллельный колебательный контур. Практнчески в большннстве случаев параллельный контур используют в качестве анодной нагрузки электронной лампы, которую можно рассматривать как нсточннк переменной э. д. с. E с внутренним сопротивленнем R_i (на рис. 66, *а* обозначено пунктиром).

Полагая, что прн любой частоте нсточннк развивает одиу н ту же э. д. с., выясним завнсимость тока в общей цепн I_0 н напряжения на контуре $U_к$ от частоты, т. е. рассмотрим резонансные крнвые параллельного контура. Форма резонансных кривых завнсит не только от свойств контура, но н от соотношения велнчнн внутреннего сопротнвлення нсточника R_i н эквивалентного сопротивлення контура при резонансе $R_э$.

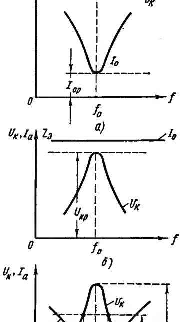
1. Пусть сопротнвленне контура $z_э$ намного больше R_i. Ток в общей цепн является функцней настройки контура и может быть определен по формуле $I_0 \approx \dfrac{E}{z_э}$. В момент резонанса, когда сопротнвление контура максимально, I_0 будет наименьшнм. Резонансная кривая $I_0 = F(f)$ для этого случая показана на рис. 67, *а*. Напряженне на контуре $U_к$ равно E и не завнсит от частоты, т. е. в этом случае контур не

обладает нзбнрательным свойством по напряжеиню. Прн нндуктивной связн следующего каскада с контуром можно нспользовать его нзбнрательные свойства по току.

2. Пусть, наоборот, сопротнвление контура $z_э$ иамного меньше R_i. Тогда ток в общей цепи $I_0 \approx \frac{E}{R_i}$.

Ток в пнтающей цепн ие завнсит от частоты. Напряжеиие на контуре $U_к$ изменяется пропорцнонально его сопротивлению (рнс. 67,*б*). Прн резонансе $U_к$, как н сопротнвленне контура $z_э$, нмеет макснмальиое значение. Рассмотренный случай нмеет место, когда контур является нагрузкой высокочастотного пентода.

3. В случае, когда $z_э$ и R_i сонзмерны по велнчнне, нзменяются как I_0, так н $U_к$. Кривые $I_0 = F(f)$ н $U_к = \varphi(f)$ имеют внд, нзображенный иа рис. 67,*в*.



Пользуясь резонансными крнвымн, можно определнть полосу пропускания контура. Прн этом различают полосу пропускания по току ($2\Delta f_т$) н напряженню ($2\Delta f_н$). *Полосой пропускания по току* называется спектр частот, в пределах которого ток в общей цепи I_0 не превышает значення тока прн резонансе $I_{ор}$ более чем в $\sqrt{2}$ раз (рнс. 67,*в*). *Полосой пропускания по напряжению* $2\Delta f_н$ называется спектр частот, в пределах которого напряженне на контуре $U_к$ меньше напряжения на контуре при резонансе не более чем в $\sqrt{2}$ раз.

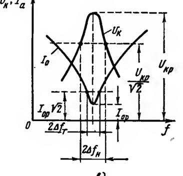


Рис. 67. Резонансные кривые параллельного контура:
а — при $z_э \gg R_i$, *б* — при $z_э \ll R_i$, *в* — $z_э$ и R_i соизмеримы по величине

Из приведенных рнсунков внлно, что полоса пропускания завнснт от соотношения $z_э$ и R_i. Так в случае $z_э \gg R_i$ полоса пропускання по иапряженню бесконечно велнка ($2\Delta f_н = \infty$), в случае $z_э \ll R_i$ полоса пропускання по току бескоиечио велнка ($2\Delta f_т = \infty$); в случае, когда $z_э$ и R_i сонзмернмы по велнчине, полосы пропускання по току н напряжеиню имеют конечные значения.

Полосу пропускання по напряженню можно определнть по формуле для определеиия полосы пропускания последовательного контура:

$$2\Delta f_н = \frac{f_0}{Q'}$$

Только здесь значение добротности следует брать с учетом шунтирующего действия внутреннего сопротивления генератора R_i.

$$Q' = \frac{Q}{1 + \frac{R_э}{R_i}}.$$

Действительно, для первого случая, когда $R_i \ll R_э$, тогда $Q' \rightarrow \rightarrow 0$ и полоса пропускания по напряжению $2\Delta f_н \rightarrow \infty$, т. е. в этом случае контур не обладает избирательными свойствами по напряжению.

§ 29. СВЯЗАННЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ

В предыдущих параграфах были рассмотрены электрические колебания в одиночном контуре. В современной радиоаппаратуре используют связанные цепи, чаще всего состоящие из двух контуров, в которых

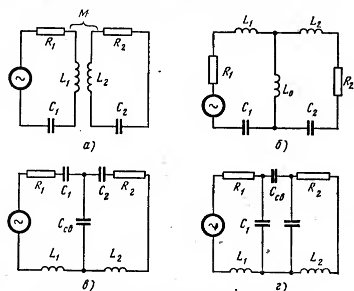


Рис. 68. Виды связи между контурами:
а — трансформаторная *б* — автотрансформаторная, *в* — внутренняя емкостная, *г* — внешняя емкостная

энергия из первой цепи может передаваться во вторую, и наоборот. Цепь, в которой находится источник энергии, называется *первичной*; в которой находится потребитель энергии — *вторичной*. Взаимное влияние контуров друг на друга происходит через общий для них элемент, называемый *элементом связи.*

Виды связи. В зависимости от способа взаимного влияния контуров различают трансформаторную, автотрансформаторную и емкостную связь.

При трансформаторной (или индуктивной) связи (рис. 68, *а*) переменный магнитный поток катушки L_1 наводит э. д. с. в катушке L_2. Наведенная э. д. с. возбуждает колебания во вторичном контуре. При автотрансформаторной связи (рис. 68,*б*) напряжение, питающее вторичный контур, снимается с катушки L_0. Емкостная связь имеет две разновидности: внутреннюю и внешнюю. При внутренней связи (рис. 68, *в*) напряжение, питающее вторичный контур, снимается с конденсатора связи $C_{св}$; при внешней связи (рис. 68,*г*) элементом связи служит конденсатор $C_{св}$. Ток, ответвляющийся из первичного контура во вторичный через емкость $C_{св}$, возбуждает колебания во вторичном контуре.

Степень взаимного влияния двух контуров количественно учитывается *коэффициентом связи* $k_{св}$, определяемым по формуле

$$k_{св} = \frac{x_{св}}{\sqrt{x_1 x_2}}, \tag{37}$$

где $x_{св}$ — сопротивление элемента связи; x_1 и x_2 — реактивные сопротивления контуров, имеющие тот же характер, что и сопротивление элемента связи.

Подставив значения $x_{св}$, x_1 и x_2, получим формулы для определения $k_{св}$ при различных видах связи.

Для контуров с трансформаторной связью

$$k_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где M — взаимная индуктивность;

для контуров с автотрансформаторной связью

$$k_{св} = \frac{L_0}{\sqrt{(L_0 + L_1)(L_0 + L_2)}};$$

для контуров с внутренней емкостной связью

$$k_{св} = \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{\sqrt{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}};$$

для контуров с внешней емкостной связью

$$k_{св} = \frac{C_{св}}{\sqrt{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}.$$

Физический смысл коэффициента связи легко объяснить на примере трансформаторной связи между двумя контурами с одинаковыми индуктивностями L_1 и L_2. Коэффициент связи показывает, какую долю магнитного потока Φ_1 катушки L_1 составляет магнитный поток $\Phi_{св}$, пронизывающий обе катушки, т. е. связывающий обе цепи.

В контурах с трансформаторной связью для увеличения связи между ними нужно сближать катушки L_1 и L_2 и увеличивать взаимную индуктивность M.

В контурах с автотрансформаторной связью для увеличения связи нужно увеличивать индуктивность L_0, так как при этом увеличивается сопротивление элемента связи:

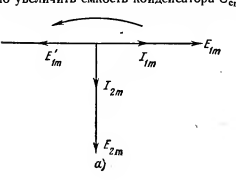
$$x_{св} = \omega L_0.$$

В контурах с внутренней емкостной связью для увеличения связи нужно уменьшать емкость $C_{св}$. Как и в предыдущем случае, при этом увеличивается сопротивление элемента связи:

$$x_{св} = \frac{1}{\omega C_{св}}.$$

В контурах с внешней емкостной связью для увеличения связи нужно увеличить емкость конденсатора $C_{св}$, т. е. уменьшать его сопротивление. При этом меньшая часть напряжения, снимаемого с конденсатора C_1, будет падать на этой емкости, а бо́льшая часть будет падать на вторичном контуре.

Рассмотрим вынужденные колебания в контурах с трансформаторной связью. Предположим, что каждый из контуров в отдельности настроен на частоту э. д. с. источника E_{1m}, т.е. в каждом из контуров выполняется условие резонанса напряжения. В этом случае ток, протекающий в первичном контуре I_{1m}, совпадает по фазе с напряжением E_{1m}. Этот ток создает на зажимах катушки вторичного контура э. д. с. взаимоиндукции $E_{2m} = I_{1m}\ \omega M$, которая отстает по фазе от тока I_{1m} на угол 90°. Под действием этой э. д. с. во вторичном контуре появляется ток I_{2m}. Из условия резонанса этот ток совпадает по фазе с э. д. с. E_{2m} и равен:



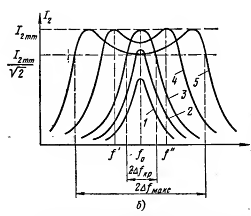


Рис. 69. Связанные контуры:
а — векторная диаграмма, б — резонансные кривые

$$I_{2m} = \frac{E_{2m}}{R_2} = \frac{I_{1m}\,\omega M}{R_2}. \qquad (38)$$

Но этот ток в свою очередь создает на зажимах катушки L_1 первичного контура э. д. с. взаимоиндукции

$$E'_{1m} = I_{2m}\,\omega M = I_{1m}\frac{(\omega M)^2}{R_2}, \qquad (39)$$

которая отстает по фазе от тока I_{2m} на угол 90°.

На векторной диаграмме (рис. 69, *а*) токи I_{1m}, I'_{2m}, напряжения E_{1m}, E_{2m} и E'_{1m} изображены в виде векторов. Как видим, э. д. с. E'_{1m} противоположна э. д. с. источника E_{1m}. Это указывает на то, что э. д. с. E'_{1m} противодействует первичному току I_{1m} и уменьшает его величину:

$$I_{1m} = \frac{E_{1m} - E'_{1m}}{R_1}.$$

Подставив сюда значение E'_{1m} из выражения (39), получим формулу для тока первичного контура:

$$I_{1m} = \frac{E_{1m}}{R_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2}} = \frac{E_{1m}}{R_1 + R_{вн}}. \qquad (40)$$

Итак, когда вторичный контур настроен в резонанс с частотой источника, его влияние на первичный контур можно рассматривать как внесение в первичный контур некоторого дополнительного активного сопротивления, называемого *вносимым сопротивлением* $R_{вн}$:

$$R_{вн} = \frac{(\omega M)^2}{R_2}. \qquad (41)$$

Вносимое сопротивление тем больше, чем сильнее связь между контурами. Величина $R_{вн}$ характеризует переход некоторого количества энергии из первичного контура во вторичный.

Когда вторичный контур не настроен в резонанс с частотой источника, он вносит в первичный контур не только активное, но и реактивное — индуктивное или емкостное — сопротивление. При этом, если сопротивление вторичного контура имеет индуктивный характер, вносимое им в первичный контур сопротивление имеет емкостный характер, и наоборот. Отсюда следует, что вторичный контур, будучи сам расстроенным, нарушает настройку и первичного контура.

Резонансные кривые. Выясним зависимость тока вторичного контура от частоты э. д. с. источника для системы из двух одинаковых контуров с равными собственными частотами:

$$f_{01} = f_{02} = f_0.$$

Предположим сначала, что связь между контурами слабая. Полученная для этого случая резонансная кривая *1* [$I_2 = F(f)$] показана на рис. 69, *б*. Увеличим связь между контурами. Максимальное значение тока при резонансе I_{2m} будет больше, чем в первом случае (кривая *2*). При некоторой величине связи, называемой *критической связью*, значение тока достигает наибольшей величины I_{2mm}.

При критической связи вносимое в первичный контур активное сопротивление равно собственному сопротивлению этого контура R_1.

$$R_{вн} = R_1.$$

Сделаем связь между контурами выше критической. В этом случае резонансные кривые имеют двугорбую форму. Уменьшение величины тока на частоте резонанса f_0 объясняется тем, что вносимое сопротивление стало больше собственного сопротивления первичного контура R_1.

$$R_{вн} > R_1.$$

При расстройке вносимое сопротивление уменьшается и на некоторых частотах, например f' и f'', восстанавливается равенство $R_{вн} = R_1$. На этих частотах ток во втором контуре вновь достигает значения I_{2mm}. По мере увеличения связи между контурами провал в резонансной кривой становится все больше и разница по частоте между двумя горбами этой кривой возрастает.

Полоса пропускания. Полоса пропускания связанных контуров определяется шириной резонансной кривой на уровне $\frac{I_{2mm}}{\sqrt{2}}$. Как показывает рис. 69, *б*, полоса пропускания тем шире, чем сильнее связь между контурами. Наибольшая полоса пропускания связанной системы $2\Delta f_{макс} = 3{,}1 \frac{f_0}{Q}$, т. е. в 3,1 раза больше полосы пропускания одиночного контура.

При критической связи полоса пропускания

$$2\Delta f_{кр} = 1{,}41 \cdot \frac{f_0}{Q}.$$

Настройка связанных контуров. Пусть оба контура настроены в резонанс на частоту генератора ($f_{01} = f_{02} = f_0$). Начнем изменять настройку первичного контура изменением емкости C_1. Ток I_{1m} по мере расстройки первичного контура будет уменьшаться, но вместе с тем будет уменьшаться и ток I_{2m} во вторичном контуре.

Зависимость I_{1m} и I_{2m} от емкости C_1 показана на рис. 70, *а*. Теперь начнем изменять настройку вторичного контура изменением C_2. По

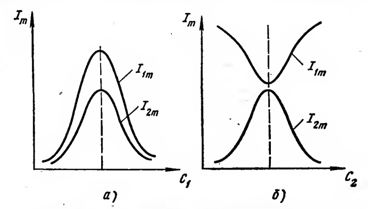


Рис. 70. Изменение токов в контурах при настройке:
а — первичного контура, *б* — вторичного контура

мере отхода вторичного контура от резонанса I_{2m} будет уменьшаться. Но с уменьшением I_{2m} уменьшается вносимое в первичный контур активное сопротивление $R_{вн}$, а I_{1m} соответственно увеличивается. Зависимость I_{1m} и I_{2m} от C_2 показана на рис. 70, *б*.

Применение связанных контуров. Резонансная кривая связанной системы с увеличением связи между контурами становится более тупой, а ее склоны — более крутыми. Можно подобрать связь между контурами такой величины, чтобы резонансная кривая системы была по форме близка к идеальной П-образной характеристике. Такую систему, называемую *двухконтурным фильтром*, применяют главным образом в цепях усиления промежуточной частоты радиоприемников. Достоинством такого фильтра является то, что он обеспечивает почти равномерное пропускание определенной полосы частот и более сильное ослабление частот, выходящих за пределы этой полосы.

Примером применения двухконтурной системы в радиопередатчиках может служить связь контура, питаемого лампой, с передающей антенной. Антенную цепь можно рассматривать как колебательный контур.

§ 30. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ

Применение колебательных контуров с сосредоточенными постоянными на сверхвысоких частотах (СВЧ) ограничивается тем, что по мере увеличения частоты возрастают потери в контуре и уменьшается его добротность. Эти потери обусловлены поверхностным эффектом,

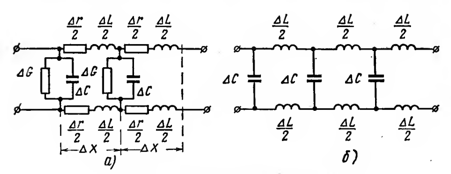


Рис. 71. Эквивалентные схемы двухпроводной линии: *а* — реальной, *б* — идеальной

диэлектрическими потерями и потерями на излучение электромагнитной энергии. Поэтому в диапазоне СВЧ в качестве колебательных систем используют системы с распределенными постоянными.

Двухпроводная линия является примером такой системы. На рис. 71, *а* показана эквивалентная схема реальной двухпроводной линии. Каждый, хотя бы очень короткий, отрезок линии длины Δx

обладает некоторой индуктивностью ΔL и сопротивлением ΔR, а между проводами существует емкость ΔC и активная проводимость ΔG. Параметры линии на единицу длины обозначают L_l, R_l, C_l, G_l. Их величина зависит от материала, диаметра проводов и расстояния между проводами. В применяемых в радиотехнике линиях в большинстве случаев $\omega L_l \gg R_l$ и $\omega C_l \gg G_l$. Эквивалентная схема такой линии без потерь изображена на рис. 71, *б*.

Рассмотрим процесс движения энергии вдоль бесконечно длинной линии (рис. 72, *а*). Подключим генератор с напряжением U к началу линии — положительным полюсом к верхнему проводу, а отрицательным к нижнему проводу. В элементе верхнего провода dy_1 запасется некоторое количество электричества. Потенциал соседнего с ним элемента dy_2 меньше на величину U. Поэтому за время dt заряд из элемента dy_1 переместится в элемент dy_2 и потенциал его станет U. Такой процесс перехода заряда от одного элемента провода к другому и соответствующее изменение напряжения будут происходить и в следующие промежутки времени.

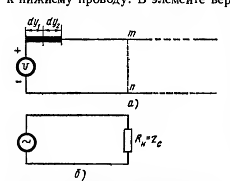


Рис. 72. Образование бегущей волны:
а — в линии бесконечной длины, *б*—в линии, нагруженной на сопротивление $R_н = z_с$

Аналогичный процесс перехода отрицательного заряда от одного элемента к другому и соответствующее изменение напряжения будут происходить и в нижнем проводе. Скорость перехода заряда от элемента к элементу провода и соответствующего изменения напряжения примерно равна скорости света ($v_0 \approx 3 \times 10^8$ м/с).

Если к линии подключен генератор переменного синусоидального напряжения, то изменение напряжения и перемещение заряда в каждом из элементов линии будут происходить тоже по синусоидальному закону. Но эти изменения будут запаздывать по фазе в соответствии с временем t, необходимым для прохождения зарядами заданного расстояния l. Поэтому фаза тока или напряжения в конце линии отличается от фазы в ее начале на некоторый угол φ.

$$\varphi = 360° \frac{t}{T}, \qquad (42)$$

где T — период приложенного к линии синусоидального напряжения.

Такое распространение напряжения вдоль линии называется *бегущей волной напряжения*, распространение заряда вдоль линии — *бегущей волной тока*. Расстояние, пройденное волной за время, равное одному периоду колебания генератора, называется длиной волны λ. Как видно из выражения (42), длине волны соответствует изменение фазового угла на 360°. Отношение напряжения к току в любой точке бесконечно длинной линии называется *характеристическим* (или *вол-*

новым) сопротивлением z_c:

$$z_c = \frac{U_м}{I_m}.$$

Характеристическое сопротивление одинаково во всех точках, в том числе и в начале линии. Поэтому входное сопротивление бесконечно длинной линии равно ее характеристическому сопротивлению ($R_{вх} = z_c$). Через параметры линии характеристическое сопротивление оп-

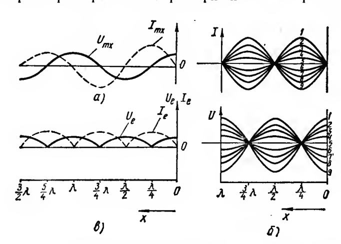


Рис. 73. Стоячие волны тока и напряжения в линиях:
а — кривые распределения амплитуд, *б* — семейство кривых, *в* — кривые распределения эффективных значений

ределяется равенством:

$$z_c = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}. \tag{43}$$

Характеристическое сопротивление линии (если пренебречь ее активным сопротивлением) не зависит от частоты.

Режим бегущей волны в линии не нарушится, если бесконечно длинную линию (рис. 72, *а*) разорвать на конечном расстоянии от генератора (точки *m* и *n*) и вместо правой части включить активное сопротивление $R_н$, равное z_c (рис. 72, *б*). Следовательно, в линии ограниченной длины, нагруженной активным сопротивлением $R_н$, равным z_c, распространяются бегущие волны, как и в бесконечно длинной линии. В этом случае говорят, что линия согласована с нагрузкой.

Если линия нагружена на сопротивление, равное характеристическому, бегущая волна напряжения или тока распространяется только от начала к концу линии, т. е. в линии имеется только *падающая*, или *прямая, волна*. Но, если нагрузочное сопротивление не равно характеристическому, часть энергии отражается и распространяется обратно от конца к началу, т. е. в линии появляется *отраженная*, или *обратная, волна*.

Если пренебречь потерями в линии, можно считать, что энергия отраженной волны равна энергии падающей волны. В результате сложения этих волн, имеющих одинаковые амплитуды и движущихся навстречу друг другу, в линии возникают так называемые *стоячие волны*.

В режиме стоячих волн амплитуды тока и напряжения изменяются вдоль линии. На рис. 73, *а* показаны кривые распределения амплитуд тока и напряжения в линии, разомкнутой на конце. В конце линии ($x = 0$) ток равен нулю, напряжение имеет максимальное значение. На расстоянии $x = \frac{\lambda}{4}$ от конца линии, наоборот, ток имеет максимальное значение, а напряжение равно нулю, и т. д. Точки, в которых ток или напряжение равны нулю, называют *узлами*, а в которых имеют максимальное значение — *пучностями*. Узлы и пучности остаются в одних и тех же точках линии, но в разные моменты времени изменяются только величины тока и напряжения.

На рис. 73, *б* показано распределение токов и напряжений вдоль линии. Каждая синусоидальная кривая соответствует определенному моменту времени. Кривые *1*, *2*, *3*, *4* изображают значения амплитудных величин тока и напряжения в моменты времени t; $t + \Delta t_1$; $t + \Delta t_2$; $t + \Delta t_3$. Прямая *5* соответствует моменту времени $t + \frac{T}{4}$. Кривые *6*, *7*, *8*, *9* изображают значения величин тока и напряжения в следующий полупериод. Кривая *9* соответствует моменту времени $t + \frac{T}{2}$. Из рассмотрения этих кривых видно, что в каждой точке линии происходят гармонические изменения тока и напряжения. При этом на разомкнутом конце и на расстояниях, кратных $\frac{\lambda}{2}$ $\left(x = 0;\ \frac{\lambda}{2};\ \lambda;\ \frac{3}{2}\lambda;\ 2\lambda \text{ и т. д.}\right)$ амплитуда тока равна нулю. В этих точках имеем узлы тока.

В точках, отстоящих от конца на расстояниях x, равных

$$\frac{\lambda}{4};\ \frac{3}{4}\lambda;\ \frac{5}{4}\lambda;\ \frac{7}{4}\lambda \text{ и т. д.},$$

амплитуда тока наибольшая. В этих точках имеем пучности тока. При этом пучности напряжения будут иметь место в точках, где x равен 0; $\frac{\lambda}{2}$; λ; $\frac{3}{2}\lambda$; 2λ, а узлы напряжения — в точках, где x равен

$$\frac{\lambda}{4};\ \frac{3}{4}\lambda;\ \frac{5}{4}\lambda;\ \frac{7}{4}\lambda \text{ и т. д.}$$

В линии, замкнутой накоротко на конце, также образуются стоячие волны в результате сложения падающей и отраженной волн. В отличие от разомкнутой линии здесь в конце линии имеется узел напряжения и пучность тока.

Обычно вместо семейства кривых, показанных на рис. 73, *б*, изображают лишь эффективные значения тока и напряжения (рис. 73, *в*).

При передаче энергии высокой частоты необходимо обеспечить в линии режим бегущей волны, т. е. надо согласовать нагрузочное сопротив-

ление с характеристическим сопротивлением линии ($R_н = z_c$). Но при нарушении согласования часть энергии отражается от конца к началу линии. В линии образуются комбинированные волны, состоящие из бегущих и стоячих волн. На рис. 74 показаны кривые распределения напряжения в линии для двух случаев: когда $R_н > z_c$ и $R_н < z_c$. При $R_н > z_c$ в конце линии имеется пучность напряжения, а при $R_н < z_c$ в конце линии, наоборот, — узел напряжения.

Для оценки относительной величины бегущей волны в комбинированной волне пользуются *коэффициентом бегущей волны КБВ*. Он равен отношению минимального напряжения или тока к его максимальному значению.

$$КБВ = \frac{U_{мин}}{U_{макс}} = \frac{I_{мин}}{I_{макс}}.$$

Иногда пользуются величиной, обратной *КБВ*, — *коэффициентом стоячей волны КСВ*.

$$КСВ = \frac{U_{макс}}{U_{мин}} = \frac{I_{макс}}{I_{мин}}.$$

Входное сопротивление линии — это сопротивление между точками подключения генератора. Оно определяется как отношение напряжения к току в любой точке линии. Так, в конце линии ($x = 0$) амплитуда напряжения $U_{вх}$ имеет максимальное значение, а ток $I_{вх}$ равен нулю. Входное сопротивление

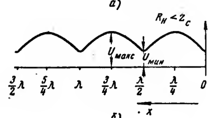


Рис. 74. Кривые распределения напряжения в линии при нарушении согласования:
а — при $R_н > z_c$, *б* — при $R_н < z_c$

$$z_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \infty .$$

Если генератор включен на расстоянии $x = \frac{\lambda}{4}$ от конца линии, где $U_{вх}$ равно нулю, а $I_{вх}$ имеет максимальное значение, то в этой точке

$$z_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = 0 \quad и \quad т. д.$$

В линии, разомкнутой на конце, входное сопротивление носит реактивный характер и определяется по формуле

$$z_{вх. хх} = - z_c \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} x. \tag{44}$$

В линии, короткозамкнутой на конце, входное сопротивление

$$z_{вх.к.з} = z_c \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} x. \tag{45}$$

При значеииях x, где входиое сопротивлеиие равио бесконечиости, лииия обладает свойством иастроеииого в резоиаис параллельиого коитура, а где входное сопротивление равио нулю — последовательиого коитура.

Мы рассмотрели свойства идеальиых лииий. В реальиых лиииях, имеющих потери, входиое сопротивлеиие кроме реактивиой составляющей имеет активиую составляющую. Графики входных сопротивлеиий несколько изменяются, входиые сопротивления ие равиы иулю и ие представляют собой сопротивлеиия бескоиечио большой величины.

Прнменение колебательных систем с распределенными постоянными. В диапазоие СВЧ в качестве колебательиых систем используют

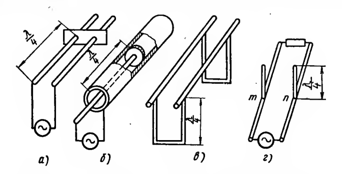


Рис. 75. Колебательные снстемы с распределенными постоянными:
а — отрезок воздушной линии, *б* — отрезок коаксиальной линии, *в* — металлический изолятор, *г* — фильтр

отрезки лииий, обладающих резонаисными свойствами. Такие колебательиые системы могут быть выполиеиы в виде двухпроводных коаксиальиых лииий и в виде отрезков замкиутых волиоводов (объемных резоиаторов). В двухпроводной воздушной лииии (рис. 75, *а*) иастройка производится перемещеиием перемычки, в коаксиальной лииии (рис. 75, *б*) — перемещеиием поршия. Добротиость такого коитура достигает иескольких тысяч.

В диапазоие дециметровых и саитиметровых воли четвертьволновый отрезок, замкиутый иа конце, используется так же, как металлический изолятор (рис. 75, *в*). Входное сопротивлеиие этого отрезка очеиь велико, а потери в таком изоляторе зиачительио меиьше, чем в обычиых изоляторах из диэлектрика. Недостатком металлического изолятора является то, что с измеиеиием частоты колебаний геиератора его входиое сопротивление умеиьшается.

Четвертьволиовый отрезок $(l = \frac{\lambda}{4})$ разомкиутой лииии используется в качестве фильтра (рис. 75, *г*). Для колебания с длиной волиы λ его сопротивлеиие очеиь мало. Если такой отрезок включить в точках m и n, он ие пропустит в нагрузку $R_н$ колебаиия с волной λ, так как является для иее короткозамкиутой цепью.

В колебательиых системах, выполиеииых в виде отрезков лиикй, иа более коротких (саитиметровых) волиах потери возрастают иастолько, что их примеиеиие стаиовится иецелесообразиым. У двухпроводиых лииий велики потери эиергии иа излучеиие и в проводах, а в коаксиальиых лиииях большие потери во виутреииeм проводе, имеющем

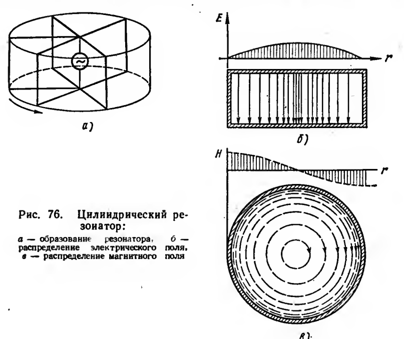


Рис. 76. Цилиидрический резоиатор:

а — образование резонатора, *б* — распределение электрического поля, *в* — распределение магнитного поля

сравнительио малый диаметр. Поэтому иа саитиметровых волиах примеияют прямоугольиые, цилиидрические и тороидальные объемиые резоиаторы, обладающие также распределеииыми иидуктивиостью и емкостью, ио в которых иет виутреииего провода.

Рассмотрим работу цилиидрического объемиого резоиатора. Возьмем отрезок четвертьволиовой лииии, замкиутой иакоротко иа коице. Такой отрезок лииии обладает свойствами параллельиого колебательиого коитура. В иачале лииии получается пучиость иапряжеиия. Соответствеиио здесь создаются иаибольшие иапряжеииость электрического поля и густота электрических силовых лииий. На коице лииии получается пучиость тока. Соответствеиио здесь создаются иаибольшие иапряжеииость магиитиого поля и густота магиитиых силовых лииий. Если вращать этот отрезок лииии вокруг ее иачала, получим поверхиость в виде цилиидра (рис. 76, *а*).

В резоиаторе силовые лйиии электрического поля замыкаются между диом и крышкой цилиидра, иаибольшая пучиость электрического поля иаходится в цеитре цилиидра (рис. 76,*б*). Распределеиие электрических лииий по диаметру резоиатора показаио иа том же рисуике.

Силовые линии магнитного поля представляют собой концентрические окружности, расположенные в плоскостях, параллельных крышке резонатора (рис. 76, *в*). Наибольшая густота магнитных линий получается по краю полости. Распределение магнитного поля по диаметру резонатора показано на том же рисунке.

На рис. 77, *а* показан способ возбуждения резонатора при помощи зонда. Оболочка трубчатого фидера соединяется с корпусом, а открытый центральный проводник этого фидера (зонд) служит элементом связи. Зонд располагают в пучности электрического поля. Электрическое поле зонда, совпадающее с направлением электрических силовых линий резонатора, возбуждает в нем незатухающие колебания.

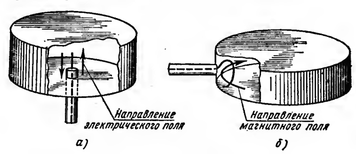


Рис. 77. Возбуждение резонатора:
а — с помощью зонда, *б* — с помощью петли связи

Способ возбуждения резонатора с помощью петли связи показан на рис. 77, *б*. Центральная жила коаксиального фидера заканчивается витком, присоединенным к внутренней стенке резонатора. Магнитное поле, образуемое вокруг витка, совпадает с направлением магнитных силовых линий резонатора и возбуждает в нем незатухающие колебания. Виток связи помещают в пучность магнитного поля.

Контрольные вопросы

1. Объясните процесс свободных колебаний в контуре.
2. Что является причиной затухания свободных колебаний в контуре?
3. Что такое затухание и добротность контура?
4. Какие колебания в контуре являются вынужденными?
5. Что называется полосой пропускания последовательного контура, и как она графически определяется по резонансной кривой?
6. Что такое резонанс напряжений и резонанс токов?
7. В каком случае контуры называют связанными?
8. Какую связь двух контуров называют критической?
9. В чем заключаются резонансные свойства двухпроводной линии?
10. Чем характеризуются режимы бегущей и стоячей волн в линии?
11. Как можно обеспечить в линии режим бегущей волны?
12. На чем основано применение четвертьволнового отрезка линии, замкнутого на конце, в качестве металлического изолятора?
13. В чем заключается принцип действия объемных резонаторов?

Глава VI

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 31. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Радиоволны, излучаемые антенной, распространяются в окружающее пространство. В зависимости от направленных свойств антенны радиоволны могут распространяться либо вдоль поверхности земли, либо под тем или иным углом к горизонту. Поэтому распространение радиоволн в пространстве зависит от свойств поверхности земли, а также от свойств атмосферы. Условия распространения радиоволн вдоль поверхности земли в значительной мере зависят от рельефа местности, электрических данных земной поверхности и длины волны.

Если бы земная поверхность была идеально проводящей, радиоволны отражались бы от нее без потерь, подобно тому, как свет отражается от идеального зеркала. Земля в этом случае оказывается экраном, препятствующим прохождению волн внутрь почвы. Но в реальных условиях земля не является ни идеальным проводником, ни идеальным изолятором. Поэтому радиоволны, распространяющиеся вдоль поверхности земли, частично поглощаются ею. Поглощение энергии радиоволн зависит также от длины распространяющейся волны: чем больше длина волны λ, тем меньше поглощение энергии. Выясним также влияние атмосферы на распространение радиоволн.

Строение земной атмосферы. Атмосфера, окружающая земной шар, представляет собой газообразную оболочку толщиной 1000—2000 км. Нижний слой атмосферы — *тропосфера*, граница которой лежит на высоте 10—12 км. В тропосфере происходят метеорологические явления — образование облаков, выпадение осадков, ветры и воздушные течения. Состояние тропосферы характеризуется давлением, температурой и влажностью. Эти параметры уменьшаются с высотой. Но иногда температура и влажность повышаются с высотой, что влияет на условия распространения ультракоротких волн. Дальше до высоты примерно 60 км следует слой, называемый *стратосферой*.

С высоты 60 км на расстоянии в тысячи километров простирается *ионосфера*. Под действием ультрафиолетовых лучей солнца и звезд, потоков электронов, испускаемых солнцем, космических лучей происходит ионизация газа. В результате этого и возникает ионосфера. Наряду с ионизацией в атмосфере происходит рекомбинация, т. е. воссоединение молекул. Ночью при прекращении действия солнечных лучей степень ионизации ионосферы уменьшается.

Но степень ионизации по высоте непостоянна. На определенных высотах имеют место максимумы ионизации. Это объясняется неоднородной, слоистой структурой атмосферы. Днем образуется четыре слоя D, E, F_1 и F_2 (рис. 78, *а*), ночью слои D и F_1 исчезают (рис. 78, *б*). Состояние ионосферы непрерывно меняется При этом наблюдаются перио-

дические и случайные, или иерегулярные, изменеиня. Кроме суточных измеиений наблюдаются изменеиия со смеиой времеии года. Летом иоиизацня слоев D, E и F_1 больше, чем знмой. Иоиизация слоя F_2, наоборот, больше зимой, чем летом.

Наблюдается одиниадцатилетний период солиечной активиости. Степеиь иоиизации связана с количеством пятен на Солнце, представляющих собой гигаитские воронки на его поверхности. Чем больше пятеи, тем больше солнечиая актнвиость н, следовательио, тем больше степеиь иоинзации. Годы макснмума следуют в среднем через 11 лет.

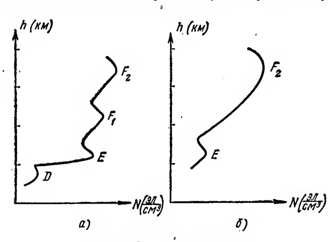


Рис. 78. Строение ионосферы:
а — днем, б — ночью

Но в ионосфере наблюдаются и иерегулярные нзменеиия — иоиосфериые бури, которые сильиее сказываются в полярных широтах. Эти бурн возиикают под воздействием заряжениых частиц, выбрасываемых солнцем, которые устремляются к магиитным полюсам Землн н являются причниой поляриых сияиий. Бури могут длиться в течеиие месяца. Оии иарушают слоистость атмосферы и могут разрушить слой F_2.

В иоиосфере происходит поглощеине энергии радиоволн. Объясняется это тем, что радиоволиа, проиикая в иоиосферу, приводит в колебательиое движеине всю массу иоиов. Онн сталкиваются между собой и с иеиоинзированными частнцами и расходуют энергию, полученную от радиоволны, превращая ее в тепло.

§ 32. ОБЩИЕ СВОЙСТВА РАДИОВОЛН РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Радиоволиы, как н другие электромагиитиые волны, обладают рядом общих свойств. Рассмотрим осиовные нз нних.

Рассеяиие эиергии волн. Радиоволны, нзлученные аитенной, расходятся во всех иаправлеииях. По мере удаления от антенны энергня

радиоволн распределяется все на большую поверхность, величина энергии в каждой точке пространства становится все меньше. Это явление называется *рассеянием энергии*.

Поглощение радиоволн. Как было показано, поглощение энергии в почве тем меньше, чем больше проводимость почвы и длина волны.

Отражение и преломление. В однородной среде радиоволны распространяются прямолинейно. При переходе волны из одной среды в другую наблюдаются *отражение и преломление*. При этом угол падения равен углу отражения. Чем больше разница в свойствах диэлектриков, а также чем длиннее волна, тем сильнее преломление.

Дифракция волн. Радиоволна, встречая на своем пути непрозрачное тело, огибает его. Это явление называется *дифракцией*. Чем длиннее волна, тем лучше она огибает препятствия. Когда размеры препятствия значительно превосходят длину волны, дифракцией можно пренебречь.

Интерференция волн. Сложение двух или нескольких волн в данном месте пространства называется *интерференцией*. Если фазы колебаний волн одного и того же источника совпадают, то амплитуда суммарного электромагнитного поля возрастает и, наоборот, при сдвиге фаз этих волн на 180° амплитуда суммарного поля уменьшается и может быть равной нулю.

Рис. 79. Распространение радиоволн: *а* — изображение радиоволн, *б* — образование зоны молчания, *в* — радиоэхо

Радиоволны, распространяющиеся вдоль поверхности земли и частично огибающие выпуклость земного шара из-за дифракции, называются *поверхностными*, или *земными* (кривая *AC* на рис. 79, *а*). Радиоволны, огибающие шар вследствие однократного или многократного отражений от ионосферы и поверхности земли, называются *пространственными* (линия *ABC*).

Мы рассмотрели общие свойства радиоволн. Теперь нужно выяснить особенности распространения радиоволн различных диапазонов.

Распространение сверхдлинных, длинных и средних волн

Сверхдлинные и длинные волны (1000—100 000 м) хорошо огибают кривизну Земли и препятствия. Энергия этих волн слабее поглощается поверхностью Земли, чем энергия более коротких волн. Достоинством сверхдлинных и длинных волн является постоянство условий распространения. Напряженность поля в пункте приема остается изо дня в день практически постоянной. Поэтому эти волны используют в системах дальней радионавигации, для передачи сигналов времени и метеосводок. Для передачи таких волн на большие расстояния требуется большая мощность передатчика.

Средние волны (100—1000 м), подобно длинным волнам, могут быть как поверхностными, так и пространственными. Для этого диапазона волн характерна ограниченная дальность распространения в дневные часы и увеличение дальности в ночное время. В дневные часы пространственные волны практически отсутствуют. В слое D (см. рис. 78, *а*) эти волны испытывают незначительное поглощение и преломление. Но, попав в слой E с большей степенью ионизации, они испытывают такое сильное поглощение, что на землю почти не возвращаются. Поэтому днем связь на средних волнах осуществляется только поверхностной волной. Практически дальность действия поверхностных волн ограничивается расстоянием 1000—1500 км.

Вечером и ночью поглощение ионосферой уменьшается. Пространственная волна отражается от слоя E и мало поглощается им. Напряженность поля в пункте приема является результатом интерференции земной и пространственной волн. Когда фазы этих волн оказываются противоположными, результирующее поле минимально. Это явление называется *замиранием* или *федингом*.

Явление замирания наблюдается на более коротких волнах средневолнового диапазона. Эти замирания повторяются почти регулярно через несколько минут. Для борьбы с замиранием в приемниках применяют автоматическую регулировку усиления, которая при изменениях напряженности поля на входе уменьшает изменения напряжения на выходе приемника. Кроме того, используют специальные антифединговые антенны.

Распространение коротких волн

При распространении коротких волн энергия поверхностной волны сильно поглощается земной поверхностью, особенно над пересеченной местностью. Явление дифракции на коротких волнах не играет заметной роли, поскольку эти волны поглощаются обычно раньше, чем станет ощутимой кривизна земли. Величина напряженности поля поверхностной волны в пункте приема зависит от направленности передающей антенны. На более коротких волнах этого диапазона сказывается также высота подъема передающей и приемной антенн над землей. Дальность распространения поверхностной волны обычно не превышает 100 км.

Распространение коротких волн на большие расстояния обусловлено пространственными волнами. Для пространственных волн слой

F_2 является отражающим, а слой E — поглощающим (см. рис. 78). Распространение пространственными волнами различной длины волны зависит от степени ионизации слоев E и F_2. Днем наиболее короткие волны (от 10 до 25 м) хорошо отражаются от слоя F_2 и мало поглощаются слоем E. Эти волны называются *дневными*. Более длинные волны днем сильно поглощаются слоем E и на землю не возвращаются. Ночью степень ионизации слоев F_2 и E уменьшается. Следовательно, уменьшается поглощение слоем E и отражение от слоя F_2. В это время создаются благоприятные условия для распространения более длинных волн (от 35 до 100 м). Поглощение в слое E незначительно. Эти волны используют для связи в ночное время и называются *ночными*. Волны от 25 до 35 м хорошо распространяются в часы полуосвещенности.

На коротких волнах можно осуществить радиосвязь на больших расстояниях при сравнительно небольшой мощности передатчика. Причиной этого является очень малое поглощение энергии пространственной волны при ее распространении. Этому также способствует возможность применения остро направленных антенн и независимость пространственной волны от рельефа местности между оконечными пунктами. Но связь на коротких волнах имеет недостатки — наличие зоны молчания, замирание сигналов, радиоэхо и нарушение связи под действием ионосферных возмущений.

Зона молчания. Поверхностная волна имеет небольшую дальность действия (точка A на рис. 79, *б*). Чем короче волна и меньше мощность передатчика, тем дальность меньше. Пространственная волна отражается от ионосферы только в том случае, если угол падения θ больше критического угла $\theta_{кр}$ (рис. 79, *б*). До точки $Б$ пространственная волна не отражается, так как ее угол падения меньше критического угла. Зона между точками A и $Б$, в которой отсутствует прием, называется *зоной молчания* или *мертвой зоной*.

Замирание сигналов. Степень ионизации слоев ионосферы непрерывно меняется. Это приводит к изменению длины путей радиоволн и величины фазовых сдвигов между ними. При совпадении этих волн по фазе результирующее поле в пункте приема усиливается. Но когда фазы этих волн оказываются противоположными, результирующее поле становится минимальным. Таким образом, как и на средних волнах, вследствие интерференции нескольких волн возможно замирание.

Радиоэхо. Оно наблюдается, когда сигналы от передатчика приходят к приемнику двумя путями (рис. 79, *в*): кратчайшим путем (прямой сигнал) и вокруг земного шара (обратный сигнал). Радиоэхо — вредное явление, так как оно искажает принимаемые радиосигналы.

Эффект Кабанова. При падении пространственных волн на Землю происходит их рассеянное (диффузное) отражение. Часть отраженных волн проходит обратный путь, вновь отражаясь от ионосферы, и попадает в район излучения. Советский инженер И. И. Кабанов открыл возможность обнаруживать возвращенные волны с помощью приемника, расположенного вблизи передатчика, излучающего короткие радиоимпульсы.

Это позволяет определять критический угол $\theta_{кр}$ для данной волны и при данном ионизированном слое. На экране осциллоскопа приемни-

ка наблюдается первнчный (зондирующий) нмпульс и сдвннутый по времени возвратно отраженный нмпульс (рнс. 80, *а*). Измерив по шкале время запаздывання возвратного нмпульса Δt, можно определить путь, пройденный радноволной от передатчика до точки рассеянного отраження, и обратно:

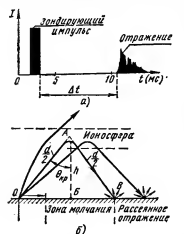


Рис. 80. Эффект Кабанова:
а — наблюдение отраженного импульса, *б* — схема распространения радноволн

$$2d = v \Delta t,$$

где v — скорость распространения раднс оволны.

Из треугольннка *ОАБ* (рнс. 80, *б*) найдем

$$\cos \theta_{кр} = \frac{h}{\frac{d}{2}},$$

где h — высота ионизнрованного отражающего слоя. Отсюда можно определнть значенне $\theta_{кр}$.

Ионосферные возмущения являются одной из прнчин нарушения связи на короткнх волнах. Такне нарушення особенно снльно проявляются в областях, блнзкнх к магннтным полюсам землн.

Распространение ультракоротких волн

Волны короче 10 м относят к днапазону УКВ. Онн, как правнло, не отражаются от ноносферы н могут распространяться как поверхностные. Но н поверхностные волны снльно поглощаются местными предметами и почти не обладают свойством дифракцин. Поэтому необходимо, чтобы передающая и прнемная антенны находилнсь в пределах прямой видимости. Чтобы осуществнть связь на расстоянии в десятки километров, антенны нужно поднимать на значнтельную высоту.

Расстояние d, на которое можно осуществнть связь в пределах прямой виднмости,

$$d\,[\text{км}] = 3{,}57\left(\sqrt{h_1\,[\text{м}]} + \sqrt{h_2\,[\text{м}]}\right), \qquad (46)$$

где h_1 н h_2 — высоты подъема антенны передатчнка н прнемннка.

Но практически удается осуществнть радносвязь н за пределамн прямой вндимости. Так, волны, блнзкне к 10 м, могут распространяться как поверхностной, так н пространственной волнами. Распространенне характернзуется большой зоной молчання, раднус которой 1500—3600 км.

Наблюдаются также случаи отражения от ионосферы даже более коротких волн (до 3 м) в летние месяцы вследствие скопления облаков с повышеиной иоиизацией, располагающихся в слое E. Кроме того, наблюдается рассеяииое отражение УКВ от иеодиородиостей тропосферы или иоиосферы. Электрические свойства тропосферы (диэлектрическая проиицаемость ε и показатель преломлеиия n) в различных точках простраиства непрерывио изменяются. Причииой этого является беспорядочное движеиие воздуха, вызваиное неодииаковым разогреваиием отдельных участков почвы.

Радиоволиы, попавшие в область с неодиородной структурой, рассеиваются во все стороиы. Часть их улавливает приемная аитенна. Чтобы осуществить регулярную связь, применяют мощные передатчики и достаточно чувствительиые приемники со специальиыми аитеииыми системами.

При тропосфериом распространеиии возможна связь иа дециметровых и саитиметровых волнах. Это позволяет создать многокаиальные телефоиные и телеграфные радиорелейиые лииии, промежуточные станции которых расположеиы на расстоянии 300—500 км. При распространении в пределах прямой видимости оии располагаются на расстоянии 50—70 км.

Как показывают исследования, иоиизированиые слои также обладают мелкими иеоднородиостями, число которых зависит от ультрафиолетовых излучений солица и иоиизации, создаваемой метеорами. При использоваиии ионосферного рассеяиия связь возможна на метровых волнах (5—10 м) и длииах трассы 800—2000 км. Но искажения сигиала ограиичивают ширину спектра передаваемых сигиалов полосой в иесколько килогерц, что соответствует одиому телефоииому каналу.

Саитиметровые и дециметровые волны поглощаются в атмосфере. Энергия этих волн поглощается в тропосфере кислородом воздуха и, главным образом, каплями воды. Последние также рассеивают энергию. Поглощеиие энергии в атмосфере зависит от длииы волны. Установлено, что поглощеиие имеет резонансный характер, т. е. наибольшее поглощение получается на частотах, совпадающих с собствеиными частотами колебаиий молекул кислорода и водяного пара. Рассеяиие энергии каплями воды указывает на возможиость распространения миллиметровых и саитиметровых волн за пределами прямой видимости.

§ 33. ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОВОЛН

Антеииа является одиой из важнейших составиых частей радиоустройства. Оиа характеризуется следующими основными техиическими показателями: сопротивление излучения, волиовое сопротивление, к. п. д., диаграмма направлеиности и др. Передающая антенна предназначеиа для преобразования тока высокой частоты в эиергию излучаемых ею электромагнитиых волн; приемиая аитеина — для преобразования принятых ею электромагиитиых волн в эиергию тока высокой частоты. Одна и та же антеииа может быть использована поочередно для передачи и приема электромагнитиых волн. При этом ее основные

показатели остаются неизменными, что позволяет рассматрнвать антенны, не подразделяя их на передающие н приемные.

На рис. 81 показана антенна, полученная из развернутого четвертьволнового отрезка разомкнутой на конце линии. Антенна, как и двухпроводная линия, является снстемой с распределенными постоянными и обладает колебательными свойствами. Но в отлнчие от линии она способна излучать электромагнитные волны. Это можно объяснить кривымн распределения тока.

В четвертьволновом отрезке двухпроводной линни (рис. 81, *а*) токн в параллельных и рядом расположенных проводах равны и противоположно направлены; поэтому поля, созданные этими токами в любой

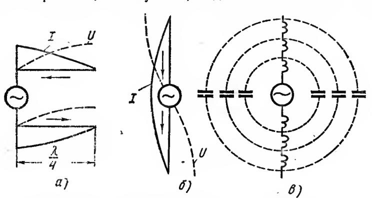


Рис. 81. Образование симметричиого вибратора:
а — четвертьволновый отрезок разомкнутой лннии, *б* — симметричный вибратор, *в* — эквивалентная схема

удаленной точке, также равны и протнвоположно направлены и результнрующее поле равно нулю. В развернутом проводе (рис. 81,*б*) токн, протекающие в обеих его половинах, направлены в одну сторону. Следовательно, поля, созданные в пространстве токамн обеих половин антенны, взаимно не уничтожаются. Рассмотренная нами антенна называется *симметричным вибратором* или *открытым колебательным контуром*.

Процесс свободных колебаиий в открытом колебательном контуре. Симметричный вибратор, как и двухпроводная линия, может быть представлен эквнвалентной схемой, состоящей из бесконечно большого количества элементарных участков, обладающих емкостью и индуктивностью (рис. 81, *в*). Подключим к вибратору нсточннк постоянной э. д. с. — плюсом к верхнему н минусом к ннжнему проводу (рис.82). Элементарные емкости зарядятся, и между половинамн вибратора образуется электрнческое поле.

Отключим источник и соеднним накоротко провода вибратора (момент $t = 0$); в нем начнется процесс свободных колебаний, возникнет разрядный ток, направленный сверху внна. Энергня электрического поля перейдет в энергию магнитного поля. К моменту $t = \frac{T}{4}$ заряд по-

ловин вибратора будет израсходован полностью, ток достигнет максимального значения. Затем ток начнет уменьшаться, кроме того, будет уменьшаться магнитное поле. Наведенная э. д. с. самоиндукции перезарядит половины вибратора зарядами обратных знаков.

К моменту $t = \frac{T}{2}$ напряжение достигнет максимального значения. После этого ток в вибраторе пойдет в обратном направлении. К моменту $t = \frac{3}{4} T$ ток достигнет максимального значения, затем он снова уменьшится и произойдет перезаряд половин вибратора зарядами обратных знаков. К моменту $t = T$ напряжение достигнет максимального значения. Затем процесс будет повторяться.

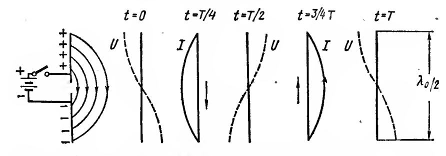


Рис. 82. Процесс свободных колебаний в открытом колебательном контуре

Таким образом, в результате свободных колебаний в симметричном вибраторе устанавливаются стоячие волны, подобно стоячим волнам в четвертьволновом отрезке разомкнутой линии: в конце вибратора — пучность напряжения и узел тока, в середине, наоборот, — узел напряжения и пучность тока.

Пользуясь кривыми распределения напряжения и тока, можно определить длину волны свободных колебаний. Как видно из рис. 82, вдоль симметричного вибратора укладывается половина волны напряжения и тока, т. е.

$$l = \frac{\lambda_0}{2},$$

где l — длина вибратора. Отсюда $\lambda_0 = 2l$. Поэтому симметричный вибратор часто называют *полуволновым вибратором*.

Процесс вынужденных колебаний в открытом колебательном контуре. Включим в середину симметричного вибратора источник синусоидальной э.д. с. В вибраторе возникнет переменный ток, изменяющийся с частотой э. д. с. Кроме того, будут изменяться электрическое и магнитное поля.

На рис. 83 показано изменение электрического поля в плоскости рисунка в течение одного периода колебаний э. д. с. источника. Пусть в момент $t = 0$ ток равен нулю, заряд вибратора равен нулю и силовые линии электрического поля не связывают половины вибратора.

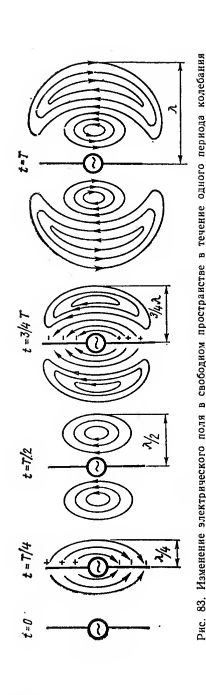


Рис. 83. Изменение электрического поля в свободном пространстве в течение одного периода колебания э.д.с. источника

В течение четверти периода $\left(\text{от } t=0 \text{ до } t=\frac{T}{4}\right)$ ток возрастает. С увеличением тока заряды перемещаются от зажимов источника вдоль проводов к их концам. Поэтому вместе с перемещением зарядов происходит перемещение силовых линий электрического поля. Это происходит до момента времени $t=\frac{T}{4}$, пока возрастает ток.

В течение следующей четверти периода $\left(\text{от } t=\frac{T}{4} \text{ до } t=\frac{T}{2}\right)$ ток уменьшается и заряды перемещаются от концов провода к его середине (к источнику). Кроме того, силовые линии электрического поля стягиваются к середине.

В момент $t=\frac{T}{2}$ ток равен нулю, заряд вибратора вновь становится равным нулю и не остается силовых линий, связывающих половины вибратора. В пространстве остаются лишь замкнутые силовые линии. Наибольшее расстояние силовых линий от вибратора равно $\frac{\lambda}{2}$.

В течение следующей четверти периода $\left(\text{от } t=\frac{T}{2} \text{ до } t=\frac{3}{4}T\right)$ в вибраторе возрастает ток противоположного направления. Вместе с перемещением заряда происходит перемещение силовых линий. При этом их направление таково, что они отталкивают в пространство силовые линии первой полуволны, образованные в течение первого полупериода.

К моменту $t=T$ образуется вторая полуволна. За один период колебания э. д. с. источника силовые линии отодвигаются от вибратора на расстояние, равное длине волны. Но при изменении электри-

ческого поля в окружающем пространстве возникает связанное с ним магнитное поле. Силовые линии магнитного поля представляют собой ряд концентрических окружностей с центрами на оси вибратора.

Совокупность электрического и магнитного полей называется *электромагнитным полем*. Составляющие электромагнитного поля — напряженность электрического поля E и напряженность магнитного поля H — являются векторами, так как имеют определенное направление. Электромагнитное поле, движущееся в пространстве, представляет собой *электромагнитную волну*, или *радиоволну*. Отметим некоторые свойства радиоволн.

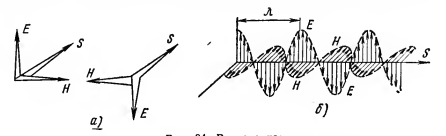


Рис. 84. Радиоволна:
а — направление распространения, *б* — графическое изображение

1. Вектор E в любой точке пространства перпендикулярен вектору H. Оба эти вектора в свободном пространстве перпендикулярны направлению распространения волны, т. е. вектору Умова—Пойнтинга S (рис. 84, *а*).

2. Направление векторов E и S определяет плоскость поляризации. *Плоскостью поляризации* называется плоскость, проходящая через векторы E и S. Если вектор S расположен параллельно поверхности земли, а вектор E вертикально, волна вертикально поляризованная; если вектор S, а также вектор E расположены параллельно поверхности земли, волна горизонтально поляризованная. Вертикально поляризованные волны создаются вертикальным вибратором (рис. 85, *а*); горизонтально поляризованные— горизонтальным вибратором (рис. 85,*б*).

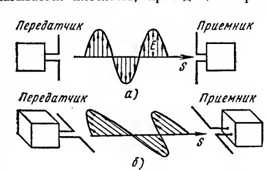


Рис. 85. Образование поляризованных волн:
а — вертикальных, *б* — горизонтальных

3. Радиоволны представляют собой бегущие волны, подобные бегущим волнам тока и напряжения в двухпроводной линии. Скорость распространения радиоволн в пространстве примерно равна скорости света ($v_0 \approx 3 \cdot 10^8$ /м/с).

4. Радиоволны в свободном пространстве можно схематически изобразить в виде двух синусоид, имеющих общую ось и расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (см. рис. 84, *б*).

§ 34. АНТЕННЫ ДЛИННЫХ, СРЕДНИХ И КОРОТКИХ ВОЛН

Антенны длинных и средних волн

Одним из основных типов антенн длинных и средних волн является вертикальная заземленная антенна, или несимметричный вибратор. Его можно получить, если один из проводов симметричного вибратора расположить вертикально над земной поверхностью, а второй заменить идеально проводящей землей (рис. 86, *а*). Длина заземленного вибратора составляет половину симметричного вибратора. Поэтому длина его собственной волны

$$\lambda_0 = 4l. \qquad (47)$$

Распределение тока I вдоль вибратора показано на рисунке. Так как по длине вибратора укладывается одна четверть волны, такой вибратор называется *четвертьволновым*. На длинных и средних волнах собственная длина волны λ_0 вертикальной антенны почти всегда меньше длины волны генератора λ. Для настройки антенны приходится λ_0 увеличивать до λ.

При рассмотрении линии, разомкнутой на конце, было показано, что когда линия короче четверти длины волны (от $x = 0$ до $x = \frac{\lambda}{4}$) ее входное сопротивление имеет емкостный характер. Включим в основание антенны катушку индуктивности (рис. 86, *б*). При определенной величине индуктивности емкостное сопротивление антенны скомпенсируется индуктивным сопротивлением катушки. Эта катушка называется *удлинительной* ($L_{удл}$), поскольку с ее помощью антенна настраивается на более длинные волны по сравнению с собственной.

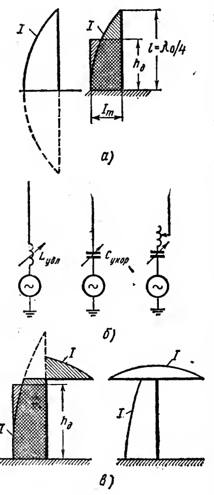


Рис. 86. Антенны длинных и средних волн:
а — заземленная, *б* — с элементами настройки, *в* — Г- и Т-образные

В средневолновом диапазоне λ_0 иногда бывает больше λ. Тогда для настройки антенны приходится уменьшать λ_0. Для этого применяют конденсатор переменной емкости, часто называемый *укорачивающим* ($C_{укор}$), так как с его помощью антенна настраивается на более короткие волны по сравнению с собственной. Часто применяют комбинированную настройку. Катушка в этом случае служит для грубой настройки антенны, конденсатор — для плавной.

При замене симметричного вибратора вертикальным землю считают идеальным проводником. Но земля редко бывает хорошим проводником, и в ней теряется некоторая часть излучаемой мощности. Чтобы уменьшить потери мощности в земле, нужно повысить ее проводимость. Это достигается устройством *заземления*. Заземлением служат металлические листы или трубы, зарываемые на уровне грунтовых вод и присоединяемые к нижнему концу антенны. Грунтовые воды являются хорошим проводником, так как содержат большое количество растворенных солей.

Иногда вместо заземления применяют противовес, представляющий собой систему проводов, подвешиваемых под антенной на небольшой высоте над землей и изолированных от земли. Противовес обеспечивает меньшие потери по сравнению с заземлением; он применяется при очень сухой почве и глубоком залегании грунтовых вод.

Мощность, подводимая от генератора к антенне, частично излучается в пространство в виде электромагнитных волн, а частично теряется на нагрев проводов и изоляторов и на потери в земле. Мощность излучения определяется формулой

$$P_{\Sigma} = I_m^2 R_{\Sigma}, \tag{48}$$

где I_m — действующее значение тока в пучности; R_{Σ} — сопротивление излучения.

Сопротивление излучения характеризует способность антенны к излучению. Величина сопротивления излучения заземленного вибратора может быть приблизительно определена по формуле

$$R_{\Sigma} = 1600 \left(\frac{h_д}{\lambda}\right)^2, \tag{49}$$

где λ — длина излучаемой волны; $h_д$ — действующая высота антенны.

Определение $h_д$ показано на рис. 86, *а*. *Действующая высота* — это высота прямоугольника, площадь которого равна площади, охватываемой кривой распределения тока и проводом антенны. Из формул (48) и (49) видно, что для увеличения мощности излучения антенны необходимо увеличить $h_д$. Этого можно добиться добавлением к вертикальному проводу горизонтальных проводов.

На рис. 86, *в* показаны антенны с горизонтальной частью: Г- и Т-образные. Площадь тока вдоль вертикальной части этих антенн возрастает и соответственно возрастает их действующая высота. Наряду с вертикальной антенной Г- и Т-образные антенны являются основными типами длинноволновых и средневолновых антенн.

Прием радиоволн основан на том, что линии электрического поля пересекают провод антенны и наводят в нем э. д. с. Величина ее определяется как произведение напряженности электрического поля E на действующую длину провода $h_д$. Рассмотренные выше типы передающих антенн можно применять и как приемные антенны. Приемные антенны, как правило, не настраивают на частоту принимаемых радиостанций. Для радиовещательного приема часто применяют вертикальные, Г- и Т-образные антенны. Часто используют также замкнутые антенны — рамочную и магнитную.

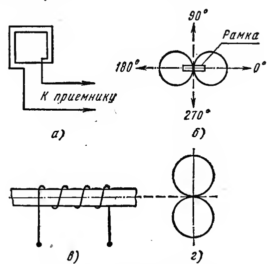


Рис. 87. Замкнутые антенны:
а — схема рамочной антенны, *б* — диаграмма направленности рамочной антенны, *в* — магнитная антенна, *г* — диаграмма напрааленности магнитной антенны

Рамочная антенна является простейшей направленной антенной. Рамку выполняют из одного или нескольких витков, имеющих квадратную, круглую или многоугольную форму. Схема одного из типов рамочной антенны показана на рис. 87, *а*. Рамочная антенна обладает направленными свойствами. Эти свойства характеризуются *диаграммой направленности*, выражающей зависимость напряженности поля E в равноудаленных от антенны точках в направлении излучения.

Диаграмма направленности рамки в горизонтальной плоскости имеет вид восьмерки (рис. 87, *б*). Наибольший прием имеет место с направления, совпадающего с плоскостью рамки, наименьший прием — с направления, перпендикулярного плоскости рамки.

Направленное свойство рамочной антенны объясняется следующим образом. Пусть плоскость рамки расположена перпендикулярно направлению приходящих радиоволн. Тогда в обеих половинах каждого ее витка наводятся э. д. с., равные по величине и противоположно направленные, а э. д. с. по всей рамке равна нулю. Но пусть плоскость

рамки расположена вдоль направления приходящих радиоволн. Тогда в обеих половинах каждого ее витка наводятся э. д. с., не равные по величине, так как радиоволна сначала доходит до одной половины витков рамки, а затем до другой. В рамке появляется некоторая разностная э. д. с., которая тем больше, чем больше размеры рамки и число ее витков.

Магнитную антенну выполняют в виде катушки с сердечником из феррита (рис. 87, *в*), имеющего довольно высокую магнитную проницаемость ($\mu = 100—1000$). Благодаря этому под действием магнитного поля радиоволны в катушке создается значительно более сильный магнитный поток, чем в антенне без сердечника. Длина сердечника примерно равна 150 мм, диаметр около 8 мм. Магнитная антенна, как и рамочная, обладает направленным свойством (рис. 87, *г*) и используется в портативных приемниках переносного типа, а также в стационарных приемниках новых выпусков.

Антенны коротких волн

На коротких волнах применяют также вертикальные антенны и антенны с горизонтальной частью. Их недостатком является зависимость дальности связи от проводимости почвы. Наиболее широко при-

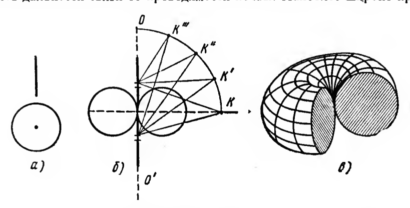


Рис. 88. Диаграмма направленности симметричного вибратора:
а — в горизонтальной плоскости, *б* — в вертикальной плоскости, *в* — пространственная

меняют в диапазоне коротких волн полуволновый симметричный вибратор. Такой вибратор, расположенный горизонтально к земной поверхности, обеспечивает максимальное излучение в направлении, перпендикулярном его оси.

Рассмотрим направленные свойства симметричного вибратора. В плоскости, перпендикулярной оси вибратора, напряженность поля одинакова для всех направлений. Поэтому диаграмма направленности имеет вид окружности (рис. 88, *а*). Рассмотрим диаграмму направленности в плоскости, совпадающей с осью вибратора. Наиболее интенсивное

излучение происходит в направлении, перпендикулярном оси вибратора, в точке K (рис. 88, *б*). Так как токи в обеих половинах вибратора направлены в одну сторону, электрические поля складываются.

В точки, расположенные на других направлениях (K', K'', K'''...), волны, излучаемые различными элементами вибратора,приходят неодновременно, т. е. со сдвигом фаз, так как они проходят разные расстояния. По мере приближения к оси OO' вибратора излучение уменьшается, а в направлении оси излучение отсутствует. Поэтому диаграмма направленности в плоскости, совпадающей с осью вибратора,

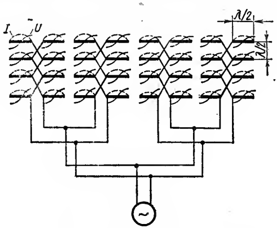


Рис. 89. Синфазная горизонтальная антенна

имеет вид восьмерки. Если эту диаграмму вращать вокруг оси OO', то получится объемная фигура, имеющая тороидальную форму (рис. 88, *в*).

Симметричный вибратор широко применяют как горизонтальный полуволновый вибратор. Кроме того, его используют как элемент многовибраторных антенн. На диаграммы направленности горизонтальных вибраторов влияет высота их подвеса над поверхностью земли. Это обусловлено тем, что в пункт приема приходят две волны: одна непосредственно от антенны, другая — отраженная от земли. Установлено, что по мере увеличения высоты подвеса горизонтального вибратора максимальное излучение в вертикальной плоскости приближается к поверхности земли.

Многовибраторные антенны обеспечивают остронаправленное излучение и прием. Система состоит из горизонтальных полуволновых вибраторов, расположенных рядами в несколько этажей. Расстояние между этажами λ/2. Если токи во всех вибраторах возбуждаются в фазе, такая антенна называется *синфазной*; если токи в соседних вибраторах находятся в противофазе — *противофазной*.

На рис. 89 изображена синфазная горизонтальная антенна. Распределение напряжения вдоль вибраторов показано сплошными линиями, распределение тока — пунктирными. Антенна концентрирует излу-

чение в направлении, перпендикулярном плоскости ее полотна, по обе стороны от него. Чем больше вибраторов в антенне, тем больше концентрация энергии. Чтобы антенна излучала только в одну сторону, сзади нее на расстоянии, равном (0,2 ÷ 0,25)λ, ставят такое же полотно антенн, называемое *рефлектором*. Рефлектор является как бы зеркалом, отражающим радиоволны в сторону корреспондента.

Вибраторы питаются от генератора двухпроводными линиями. Чтобы обеспечить синфазное возбуждение вибраторов, линии должны быть перекрещенными.

Антенны ультракоротких волн

В диапазоне УКВ применяют, как правило, направленные антенны, начиная с симметричного вибратора и кончая синфазной антенной с горизонтальными вибраторами. Используют также другие типы антенн. Рассмотрим некоторые типы антенн — метровых, дециметровых и сантиметровых волн.

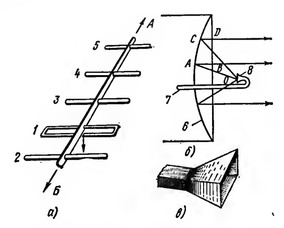


Рис. 90. Антенны ультракоротких волн:
а — антенна типа «волновой канал», *б* — параболический рефлектор, *в* — рупорная антенна; *1—5* вибраторы, *6* — параболоид, *7* — волновод, *8* — облучатель

Антенна типа «волновой канал». Устройство такой антенны показано на рис. 90, *а*. Вибратор *1* питается от передатчика и называется *активным*. Вибраторы *2*, *3*, *4* и *5* не питаются от передатчика и называются *пассивными*. Вибратор *2* выполняет функции рефлектора. Принцип действия рефлектора основан на том, что в направлении излучения (направлении *A*) волны вибраторов *1* и *2* складываются; в обратном направлении (направлении *Б*) волны этих вибраторов находятся в противофазе и излучения нет.

Вибраторы *3*, *4* и *5* называются *директорами*. Волны этих вибраторов в направлении излучения складываются с волной вибратора *1*. Чем больше количество директоров, тем большей направленностью

обладает антенна. Достоинством такой антенны является простота конструкций, недостатками — сложность регулировки и относительно большая ширина диаграммы направленности. Антенну «волновой канал» широко используют для приема телевидения. Вибраторные антенны применяют в диапазоне метровых и дециметровых волн. В диапазоне дециметровых и сантиметровых волн используют рефлекторные, рупорные и другие антенны.

Параболический рефлектор. В параболических рефлекторных антеннах роль отражателя выполняет не пассивный вибратор, а металлическое зеркало, имеющее форму параболоида вращения или параболического цилиндра. Принцип устройства параболического рефлектора показан на рис. 90, *б*. В фокусе параболоида *6* закреплен при помощи волновода *7* облучатель *8* в виде рупорной антенны. Параболоид обладает тем свойством, что длина пути любого луча от фокуса *O* до некоторой плоскости, перпендикулярной оси параболы, одинакова. Поэтому лучи, отраженные рефлектором (*OAB*, *OCD*), в плоскости выходного отверстия имеют одинаковую фазу. Физически это эквивалентно тому, как если бы в плоскости выходного отверстия имелось большое число элементарных синфазных излучателей, составляющих многовибраторную антенну.

Рупорная антенна (рис. 90, *в*). Простейшей рупорной антенной является открытый конец металлической трубы прямоугольного сечения (волновода). Излучающая часть антенны называется *раскрывом*. Отверстие волновода можно рассматривать как многовибраторную антенну, образованную из большого числа элементарных излучателей. Но такая антенна обладает недостатком. Резкое изменение условий распространения на открытом конце волновода приводит к значительному отражению, что уменьшает эффективность антенны. Кроме того, в раскрыве излученные волны огибают края конца волновода, что ухудшает направленные свойства антенны. Для уменьшения отражений и улучшения направленных свойств конец волновода выполняют в виде рупора.

§ 35. ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВОЛНОВОДЫ

Фидером называется линия, предназначенная для передачи электрической энергии высокой частоты. Фидер используют для передачи энергии от передатчика к антенне и от антенны к приемнику. Фидерные линии делят на воздушные, кабельные и волноводные. Применение того или другого класса линий и их конструктивное выполнение определяются диапазонами рабочих частот и передаваемой мощностью. Воздушные и кабельные линии используют на всех волнах от самых длинных до метровых. На сантиметровых волнах преимущественно применяют волноводы.

Двухпроводные воздушные фидеры состоят из двух параллельных проводов (рис. 91,*а*), закрепленных на изоляторах, фиксирующих их взаимное расположение.

Кабельные линии. Высокочастотные кабельные линии применяют двухпроводной и коаксиальной конструкции.

Двухпроводная кабельная линия (рис. 91,*б*) состоит из двух параллельных проводов, расположенных внутри эластичного диэлектрика, чаще всего полиэтилена. Снаружи диэлектрик покрыт оплеткой из тонких медных проволок, выполняющих роль экрана. Чтобы предохранить экран от повреждения, снаружи сделана защитная оболочка из хлорвинила, резины или другого эластичного изоляционного материала.

Коаксиальный кабель (рис. 91,*в*) состоит из внутреннего провода, вокруг которого расположен внешний провод в виде жесткой или гибкой трубы. Между ними находится изоляция в форме сплошного наполнителя из эластичного материала или в виде шайб из высокочастотной керамики. Чтобы улучшить электрические свойства, внутренний провод изготовляют из медной отожженной и посеребренной проволоки; для большей гибкости его выполняют многопроволочным. Внешний провод обычно делают из медной луженой проволоки или медной ленты. Большинство кабелей покрывают снаружи оболочкой из полихлорвинилового пластиката толщиной примерно 1 мм. Коаксиальная линия несимметрична относительно земли, так как ее внешний провод имеет значительную емкость по отношению к земле, в то время как внутренний провод экранирован внешним.

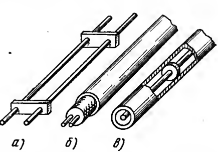


Рис. 91. Конструкции фидерных линий: *а* — двухпроводной воздушной, *б* — двухпроводной кабельной, *в* — коаксиального кабеля

Кабельные линии обладают рядом преимуществ перед воздушными. Они лучше защищены от атмосферных влияний, более надежны в эксплуатации и не излучают в пространство радиоволны.

Режим бегущей волны в фидере. При подключении согласованной нагрузки ($R_н = z_с$) в линии возникают только бегущие волны. Если потери незначительны, действующие значения напряжения и тока по всей длине линии постоянны. Величина сопротивления нагрузки $R_н$ может значительно отличаться от характеристического сопротивления фидера $z_с$. В этом случае передаваемая вдоль линии энергия поглощается нагрузкой не полностью и часть ее расходуется на создание отраженной волны. В линии наряду с бегущей волной образуются стоячие волны. Это приводит к тому, что действующие значения напряжения и тока изменяются по длине линии и имеют максимумы и минимумы.

Для согласования фидера с нагрузкой применяют согласующие устройства. Одним из таких устройств является четвертьволновый трансформатор — отрезок линии длиной $\frac{\lambda}{4}$, включенный между основным фидером и нагрузкой (рис. 92). Согласование заключается в следующем. Волна, подходящая от генератора к точкам m и n, частично отражается обратно, а частично движется через согласующий транс-

форматор к нагрузке. От нагрузки эта волна отражается и возвращается к точкам m и n.

По сравнению с волной, отраженной вначале (от точек m и n), волна, отраженная от нагрузки $R_н$, проходит лишнее расстояние, равное $2\frac{\lambda}{4}$, т. е. $\frac{\lambda}{2}$. Вследствие этого происходит сдвиг по фазе между двумя отраженными волнами, равный 180°. Если амплитуды этих волн одинаковы, происходит их полная компенсация и вдоль основного фидера распространяются только бегущие волны. Описанный принцип согласования лежит в основе и других согласующих устройств.

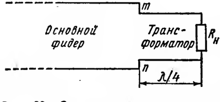


Рис. 92. Схема согласующего трансформатора

Волноводы. На волнах короче 10 см невыгодно применять коаксиальные кабели, потому что с увеличением частоты возрастают потери в изолирующих шайбах и во внутреннем проводе. На сантиметровых и более коротких волнах можно передавать электромагнитную энергию по волноводу. *Волноводом* называется полая металлическая трубка с поперечным сечением произвольной формы. На рис. 93,*а*, *б* показаны волноводы прямоугольного и круглого сечений.

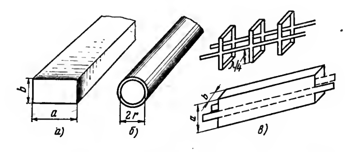


Рис. 93. Волноводы:
а — прямоугольный, *б* — круглый, *в* — переход от двухпроводной линии к прямоугольному волноводу

Для объяснения характера электромагнитного поля представим прямоугольный волновод в виде двухпроводной линии, опирающейся на короткозамкнутые четвертьволновые отрезки $\left(l = \frac{\lambda}{4}\text{; рис. 93,}в\right)$. Такие отрезки называются *металлическими изоляторами.* Их сопротивление для волны $\lambda = 4l$, очень велико, поэтому они не нарушают режим распространения энергии вдоль линии.

Если мы присоединим сверху и снизу большое количество таких отрезков, то получим трубу прямоугольного сечения, но если умень-

шим длину отрезков $\left(l < \frac{\lambda}{4}\right)$, их входное сопротивление резко упадет и провода двухпроводной линии окажутся замкнутыми почти накоротко. Следовательно, размер a волновода является критичным, он должен быть не меньше $\frac{\lambda}{2}$. Отсюда критичное значение для волны прямоугольного волновода: $\lambda_{кр} = 2a$. Волны длиннее $\lambda_{кр}$ не могут распространяться в волноводе. Для волновода круглого сечения критичное значение волны $\lambda_{кр} = 2{,}61\ r$, где r — радиус отверстия.

Для возбуждения колебаний в волноводе высокочастотную энергию подводят либо через отверстия и щели в нем, либо по коаксиальной линии, имеющей электрическую или магнитную связь с волноводом. Возбуждение волновода с помощью зонда или петли связи происходит так же, как и в объемных резонаторах. Волноводы обладают преимуществами перед коаксиальным кабелем. Они проще в конструктивном отношении, обеспечивают передачу весьма высоких частот, полную экранировку поля. Недостатком волноводов является наличие критической длины волны.

Контрольные вопросы

1. Как устроена ионосфера?
2. Каковы свойства радиоволн? Что такое дифракция и интерференция радиоволн?
3. Как влияют время суток и время года на распространение радиоволн?
4. Что такое 11-летний период солнечной активности?
5. Каковы особенности распространения ультракоротких волн?
6. Пользуясь рис. 83, объясните процесс излучения радиоволн.
7. Как распределены ток и напряжение в симметричном вибраторе?
8. Что такое действующая высота антенны?
9. Что называется сопротивлением излучения антенны?
10. В чем заключается согласование фидера с нагрузкой?
11. Что называют волноводом? Каковы преимущества волновода перед коаксиальным кабелем?

Глава VII
СПЕЦИАЛЬНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

§ 36. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ВИДЕОУСИЛИТЕЛИ)

Широкополосные усилители (видеоусилители) предназначены для усиления сигналов в широкой полосе частот, например от единиц герц до десятков мегагерц. В основу видеоусилителя положена схема резистивного усилителя, обладающего наиболее равномерной частотной характеристикой. Сначала такие усилители использовались для усиления сигналов изображения, откуда и получили название видеоусилителей.

Частотная характеристика этого усилителя имеет спад со стороны нижних и верхних частот из-за реактивных элементов схемы — разделительного конденсатора C_c и емкости C_0, подключенной параллельно выходу данного каскада. Посмотрим, какое влияние оказывают элементы схемы на искажение видеоимпульса. Пусть на вход усилителя подано напряжение прямоугольной формы (рис. 94,*а*). Начало импульса называется *передним фронтом*, конец — *задним фронтом*. Емкости C_c и C_0 приводят к искажению формы импульса, и напряжение на выходе $U_{вых}$ (рис. 94,*б*) значительно отличается от напряжения на входе $U_{вх}$, так как заряд и разряд конденсатора происходят не мгновенно, а постепенно.

При подведении к цепи *RC* напряжения, имеющего форму прямоугольного импульса (передний фронт), заряд конденсатора происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени по экспоненциальному закону (участок *om*). Заряд конденсатора и возрастание на нем напряжения происходят тем быстрее, чем меньше постоянная времени цепи $\tau_з = RC$. Соответственно, и при выключении напряжения (задний фронт) разряд конденсатора происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени по экспоненциальному закону (участок *nl*). Уменьшение напряжения происходит тем быстрее, чем меньше постоянная времени цепи разряда $\tau_р = RC$. При этом искажение переднего и заднего фронтов импульса обусловлено главным образом постоянными времени заряда и разряда емкости C_0.

Рис. 94. Искажения формы прямоугольного импульса резистивным усилителем:
а — напряжение на входе, *б* — напряжение на выходе

Причиной искажения плоской вершины импульса является наличие разделительного конденсатора. На участке *mn* уменьшение выходного напряжения обусловлено тем, что происходит заряд и увеличение напряжения на конденсаторе. Чем больше

постоянная времени цепи заряда этого конденсатора, тем медленнее происходит его заряд и меньше спад плоской части импульса.

Для неискаженной передачи резких изменений напряжения нужно хорошее воспроизведение на выходе усилителя высокочастотных составляющих напряжения. Для неискаженной передачи медленных изменений напряжений (плоской вершины импульса) нужно хорошее воспроизведение на выходе усилителя низкочастотных составляющих напряжений. Другими словами, для неискаженной передачи импульса в целом усилитель должен обладать равномерной частотной характеристикой в очень широком диапазоне частот. Для этого приходится уменьшать сопротивление анодной нагрузки (при этом уменьшается коэффициент усиления) и применять схемы коррекции частотной характеристики.

§ 37. СХЕМЫ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТАХ ДИАПАЗОНА

Схемы низкочастотной коррекции (рис. 95, *а*, *б*) служат для коррекции плоской вершины импульса. В анодную (или коллекторную) цепь каскада последовательно с выходной нагрузкой $R_н$ включается цепочка $R_ф C_ф$. Величину емкости конденсатора $C_ф$ берут такой, чтобы его сопротивление на средних частотах было ничтожно малым по сравнению с сопротивлением $R_ф$. На нижних частотах сопротивление конденсатора $C_ф$ возрастает.

При воздействии на вход каскада плоской вершины импульса растет напряжение на конденсаторе C_c, а напряжение на выходе $U_{вых}$ уменьшается. Но вместе с тем на нижних частотах, соответствующих плоской вершине импульса, возрастают сопротивления конденсатора $C_ф$, полное сопротивление нагрузки выходной цепи и коэффициент усиления. Напряжение на выходе увеличивается и поэтому выравнивается плоская вершина выходного импульса.

В схеме высокочастотной коррекции (рис. 95, *в*, *г*) последовательно с сопротивлением нагрузки $R_н$ включен корректирующий дроссель $L_к$. Его индуктивность вместе с полной емкостью C_0 составляет параллельный контур, резонансная частота которого лежит в области верхних частот. При резонансе сопротивление контура возрастает. Вместе с этим увеличиваются сопротивление нагрузки и напряжение на выходе. Это компенсирует уменьшение усиления на верхних частотах от влияния емкости C_0:

$$C_0 = C_{вых\,1} + C_{вх\,2} + C_м,$$

где $C_{вых1}$ — выходная емкость каскада; $C_{вх2}$ — входная емкость следующего каскада; $C_м$ — емкость монтажа.

Кроме описанных схем существуют схемы со сложной коррекцией, коррекцией верхних частот при помощи фильтра RC и др.

В ламповых видеоусилителях используют специальные широкополосные пентоды. Как было показано, коэффициент усиления резистивного усилителя на пентоде K равен $SR_а$. Но в широкополосном усилителе на верхних частотах начинает оказывать влияние

паразитная емкость C_0. При возрастании частоты сопротивление этой емкости уменьшается. Общее нагрузочное сопротивление также уменьшается, уменьшается и коэффициент усиления каскада.

Для обеспечения значительного усиления в широкой полосе частот лампа должна иметь большую крутизну S и малую C_0. Другими словами, широкополосная лампа должна обладать большим отношением

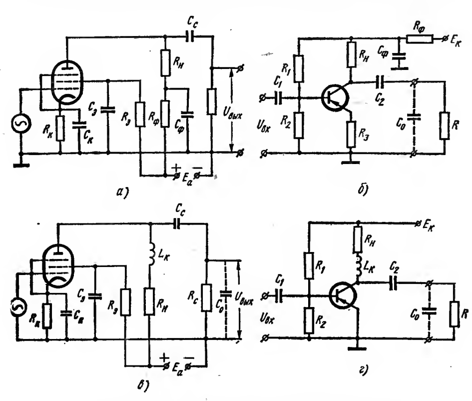


Рис. 95. Схемы коррекции частотной характеристики:
а — ламповая низкочастотная, *б* — транзисторная низкочастотная, *в* — ламповая высокочастотная, *г* — транзисторная высокочастотная

$$\frac{S}{C_0}.$$

В паразитную емкость C_0 в основном входят емкости $C_{\text{вых}\,1}$ и $C_{\text{вх}2}$:

$$C_0 \approx C_{\text{вых}\,1} + C_{\text{вх}\,2}.$$

Отношение $\gamma = \dfrac{S}{C_{\text{вых}\,1} + C_{\text{вх}\,2}}$ называется *коэффициентом широкополосности лампы*. Чем больше γ, тем большее усиление обеспечивает лампа в заданной полосе частот.

К широкополосным лампам относят пентоды 6Ж14П, 6Ж5П, 6Ж9П, 6Ж11П, 6П9, 6П15П и др.

При выборе схем коррекции видеоусилителей на транзисторах учитывают значительную нестабильность параметров транзисторов в связи с температурой, режимом работы и другими факторами. Так как сложные схемы высокочастотной коррекции очень критичны к параметрам элементов, то в транзисторных видеоусилителях преобладают схемы каскадов с одним элементом коррекции. На рис. 95,г показана схема транзисторного видеоусилителя с простой высокочастотной коррекцией. В транзисторных видеоусилителях используют высокочастотные транзисторы, имеющие высокую граничную частоту (П-402, П-403, П-416, КТ-315, КТ-326 и др.).

§ 38. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим работу усилителей, в которых происходит усиление не только переменной, но и постоянной составляющей сигнала. Такие усилители называют усилителями постоянного тока. Их применяют в радиоэлектронной аппаратуре, ламповых вольтметрах, осциллоскопах, схемах автоматической регулировки усиления радиоприемников, стабилизации тока и напряжения. Эти усилители делят на два основных типа: усилители прямого усиления и усилители с преобразованием.

Усилители прямого усиления. Чтобы осуществить усиление не только переменной, но и постоянной составляющей сигнала, применяют схему гальванической связи между каскадами. Она не должна содержать деталей, сопротивление которых зависит от частоты. Так, нельзя использовать для этой цели схему резистивного усилителя, так как в ней разделительный конденсатор преграждает путь постоянной составляющей анодного напряжения к управляющей сетке следующей лампы.

Одной из схем усилителя постоянного тока является схема с делителем напряжения (рис. 96, *а*). Каскады усилителя питают от делителя напряжения $R_1 - R_5$, подключенного к источнику питания E_a. Напряжение смещения на сетку лампы *Л1* снимается с сопротивления R_1. Напряжение анодного питания на лампу *Л1* снимается с сопротивлений R_2 и R_3. Напряжение смещения на сетку лампы *Л2* снимается с сопротивлений делителя R_3 и анодной нагрузки R_{a1}. При этом величину сопротивления R_3 подбирают такой, чтобы напряжение, снимаемое с него, было меньше падения напряжения на сопротивлении R_{a1} на величину необходимого отрицательного смещения на сетке лампы *Л2*.

Напряжение анодного питания на лампу *Л2* снимается с сопротивлений $R_3 - R_5$. При этом величину напряжения, снимаемого с R_5, берут равной падению напряжения на R_{a2}. Тогда выходное напряжение $U_{вых}$, снимаемое с анода лампы *Л2* и точки соединения сопротивлений R_4 и R_5, при отсутствии сигнала на входе лампы *Л1* оказывается равным нулю.

Частотная характеристика усилителя постоянного тока изображена на рис. 96,*б*. Как видно, коэффициент усиления K при уменьшении частоты сигнала f до нуля остается таким же, как и на средних частотах.

В рабочих условиях напряжение на электродах изменяется во времени. Причинами этих изменений являются: изменение напряжения источников питания усилителя, изменения параметров ламп и деталей схемы вследствие их старения и колебания окружающей температуры. Изменения напряжения усиливаются последующими каскадами и поступают на выход. В результате при отсутствии напряжения сигнала

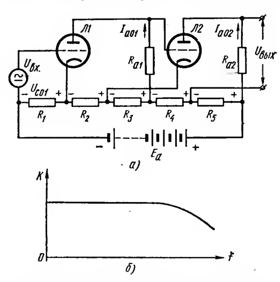


Рис. 96. Усилитель постоянного тока прямого усиления:
а — схема, *б* — частотная характеристика

на входе усилителя на его выходе появляется напряжение (рис. 97). Оно имеет медленно изменяющуюся во времени постоянную составляющую (пунктирная кривая) и беспорядочные колебания около постоянной составляющей (ломаная кривая). Это явление называется *дрейфом нуля*. Его оценивают как самопроизвольное изменение выходного напряжения в вольтах за определенный отрезок времени.

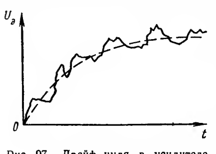


Рис. 97. Дрейф нуля в усилителе постоянного тока

Дрейф нуля — очень вредное явление в усилителе постоянного тока. Если напряжение дрейфа на выходе усилителя окажется порядка напряжения сигнала, искажения в работе усилителя будут недопустимо большими. Напряжение дрейфа может также вывести рабочую точку за пределы рабочей области характеристики прибора. Основными способами уменьшения напряжения дрейфа являются: предвари-

тельный прогрев усилителя, стабилизация источников питания и использование компенсационных и балансных схем.

Одной из таких схем является схема с катодной компенсацией, уменьшающая дрейф от изменения напряжения накала (рис. 98). В этой схеме обычно используют сдвоенный триод. Лампа *Л2* является компенсационной. Сопротивления R_1 и R_2, включенные в общий катодный провод, служат для подачи отрицательного смещения на сетки ламп. На лампу *Л1* подается смещение с сопротивления $R_1 + R_2$, а на лампу *Л2* — с сопротивления R_1. При увеличении напряжения накала возрастает напряжение дрейфа. Ток в цепи анода лампы *Л2* возрастает, а вместе с этим увеличивается падение напряжения на сопротивлении $R_1 + R_2$. Отрицательный полюс этого напряжения подается на сетку лампы *Л1*, и происходит компенсация напряжения дрейфа. Для полной компенсации напряжения дрейфа сопротивление R_2 берут равным $1/S_2$, где S_2 — крутизна характеристики лампы *Л2* в точке покоя.

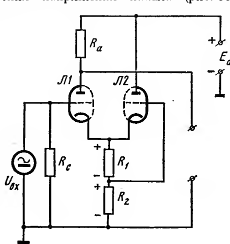


Рис. 98. Схема усилителя постоянного тока с катодной компенсацией дрейфа нуля от изменения напряжения накала

Усилители с преобразованием. В усилителях постоянного тока прямого усиления колебания напряжения дрейфа удается снизить примерно до 100 мкВ. Для усиления напряжения ниже этой величины применяют усилители постоянного тока с преобразованием. Структурная схема такого усилителя показана на рис. 99. Напряжение сигнала U_1, имеющее спектр частот от 0 до $f_в$, при помощи балансного модулятора *БМ* модулирует по амплитуде напряжение генератора *Г* несущей частоты *F*.

Колебание несущей частоты подавляется модулятором, и на его выходе появляются модулированные колебания со спектром нижней и верхней боковых полос, лежащим в пределах от $F - f_в$ до $F + f_в$. После усилителя *У* эти колебания подаются на балансный детектор *БД*, который выделяет из модулированных колебаний первоначальный модулирующий сигнал со спек-

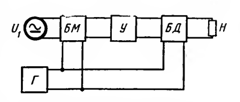


Рис. 99. Структурная схема усилителя постоянного тока с преобразованием

тром частот от 0 до $f_в$. С выхода детектора сигнал поступает в нагрузку H. Для неискаженного усиления несущая частота F должна превосходить наивысшую частоту усиливаемых колебаний $f_в$ не менее чем в 5—10 раз.

Усилители постоянного тока с преобразованием обладают рядом преимуществ перед усилителями постоянного тока прямого усиления: значительно меньший уровень дрейфа, что позволяет усиливать слабые сигналы; малая чувствительность к колебаниям питающих напряжений, что дает возможность обходиться без их стабилизации; простота введения обратной связи и регулировки усиления. Недостатком является относительная сложность их схемы и узкая полоса пропускания.

§ 39. ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Фазочувствительные усилители на лампах. Фазочувствительные усилители преобразуют переменное напряжение сигнала в постоянное напряжение, полярность которого определяется фазой входного сигнала. Такие усилители применяют в системах автоматики.

На рис. 100, *а* показана с х е м а о д н о п о л у п е р и о д н о г о ф а з о ч у в с т в и т е л ь н о г о у с и л и т е л я. На анод подается переменное напряжение $U_а$. В течение положительных полупериодов этого напряжения через нагрузочное сопротивление $R_н$ протекает выпрямленный ток в виде полуволн одного знака. Если на сетку лампы подается переменное напряжение $U_с$, совпадающее по фазе с анодным напряжением $U_а$, т. е. к аноду и сетке приложены положительные напряжения, амплитуда полуволн анодного тока увеличивается. Если же $U_с$ и $U_а$ находятся в противофазе, т. е. к аноду приложено положительное напряжение, а к сетке — отрицательное, амплитуда анодного тока уменьшается. При некоторой величине отрицательного напряжения на сетке ток может полностью прекратиться.

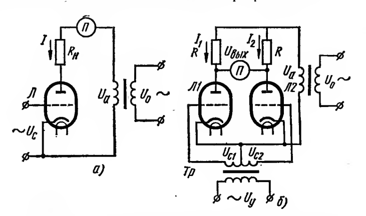


Рис. 100. Однополупериодные фазочувствительные усилители на электронных лампах:
а — однoламповая схема, *б* — дифференциальная двухламповая схема

От фазочувствительного усилителя требуется, чтобы при $U_c = 0$ выходные ток или напряжение также были равны нулю; а при изменении фазы U_c на обратную выходные ток и напряжение изменили свою полярность. В рассмотренной схеме эти требования не выполняются. При $U_c = 0$ имеется некоторый ток; при изменении фазы выходной ток изменяет лишь свою величину, но не направление. Не изменяется полярность выходного напряжения.

Указанным выше требованиям отвечают **дифференциальные фазочувствительные усилители** (рис. 100,*б*). В однополупериодной схеме такого усилителя два вакуумных триода *Л1* и *Л2* питаются общим напряжением U_a. В цепи анодов ламп вклю-

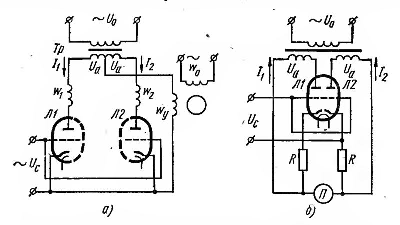


Рис. 101. Двухполупериодные фазочувствительные усилители:
а — аноды ламп питаются от общей вторичной обмотки трансформатора, *б* — аноды ламп питаются от двух раздельных вторичных обмоток трансформатора

чены одинаковые резисторы R. Выходное напряжение $U_{вых}$ измеряется между анодами ламп. Напряжения на сетки U_{c1} и U_{c2} подаются в противофазе. Если управляющее напряжение U_y, подаваемое на первую обмотку трансформатора, равно нулю, то токи обеих ламп равны $(I_1 = I_2)$ и выходное напряжение $U_{вых} = I_1R - I_2R = 0$.

Пусть к аноду приложено положительное напряжение. К сетке лампы *Л1* приложено положительное напряжение, а к сетке лампы *Л2* — отрицательное. Тогда ток I_1 увеличится, а ток I_2 уменьшится. Появится выходное напряжение $U_{вых} = (I_1 - I_2)R$. Если же изменить полярности напряжений U_{c1} и U_{c2} на обратные, ток I_1 уменьшится, ток I_2 увеличится и появится выходное напряжение обратной полярности. Если вместо резисторов включить обмотки дифференциального реле, то выходной величиной будет не напряжение $U_{вых}$, а разность м. д. с. $(I_1w_1 - I_2w_2)$.

В системах автоматики применяются также **двухполупериодные фазочувствительные усилители**. На рис. 101 изображены два типа таких усилителей. В этих схемах аноды ламп питаются в противофазе. В схеме первого типа (рис. 101,*а*) анодный ток I_1 через лампу *Л1* течет в течение одного полупериода, а ток I_2 через

лампу *Л2* — в течение другого. Общий ток $I = I_1 + I_2$ протекает в течение обоих полупериодов через общий провод и обмотку $w_у$.

Когда напряжения на сетках $U_с$ равны нулю, обе выпрямленные полуволны тока одинаковы. Если $U_с$ совпадает по фазе с анодным напряжением *Л1*, ток I_1 возрастает, а ток I_2 уменьшается. При опрокидывании фазы $U_с$ ток I_1 уменьшается, а ток I_2 увеличивается. В анодные цепи ламп *Л1* и *Л2* включены обмотки w_1 и w_2 исполнительного органа (обмотки реле, обмотки возбуждения и др.). При изменении фазы входного напряжения изменяется разность м. д. с. и их знаки. В описанной

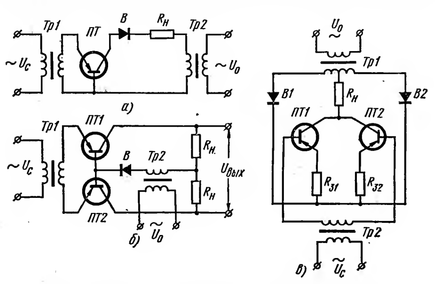


Рис. 102. Схемы фазочувствительных усилителей на транзисторах: *а* — простейшая, *б* — дифференциальная, *в* — двухполупериодная

схеме между анодами ламп *Л1* и *Л2* помимо постоянной составляющей действует большое переменное напряжение, равное $2U_а$.

В схеме второго типа (рис. 101,*б*) вторичные обмотки трансформатора разделены. При подаче на сетки ламп напряжения $U_с$ той или другой фазы появляется постоянная составляющая напряжения $U_{вых} = (I_1 - I_2)R$ соответствующей полярности.

Фазочувствительные усилители на транзисторах. На рис. 102, *а* изображена простейшая схема однополупериодного фазочувствительного усилителя. Транзистор включен по схеме с *ОБ*. Входное напряжение подается к эмиттеру через трансформатор *Тр1*, питающее напряжение — через трансформатор *Тр2*. При совпадении $U_с$ и U_0 по фазе в течение одного полупериода через $R_н$ течет ток. Если фазы $U_с$ и U_0 противоположны, ток в цепи нагрузки отсутствует.

На рис. 102,*б* показана дифференциальная схема усилителя, принцип действия которой подобен схеме, изобра-

женной на рис. 100,*б*. Усилитель работает на дифференциальную нагрузку, составленную из двух резисторов $R_н$. Когда к коллектору приложена положительная полуволна напряжения, через него может протекать ток обратного направления. Это снижает к. п. д. усилителя. Для устранения этого недостатка включают вентиль *B1*, не пропускающий ток обратного направления.

На рис. 102,*в* изображена схема двухполупериодного фазочувствительного усилителя на транзисторах. Эта схема является соединением двух однополупериодных схем.

§ 40. РЕЗОНАНСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Резонансные усилители применяют в радиоустройствах для усиления относительно узкой полосы частот. Нагрузкой усилителя является резонансная система, настроенная на частоту принятого сигнала. Усилители, в которых нагрузкой служит колебательный контур, называют *резонансными*. Усилители, в которых используют полосовые фильтры,— *полосовыми*.

Резонансный усилитель характеризуется коэффициентом усиления, полосой пропускания и избирательностью.

Коэффициент усиления K_0 определяется как произведение крутизны лампы S на сопротивление параллельного контура при резонансе $R_э$:

$$K_0 = S R_э.$$

При наличии в схеме нескольких каскадов с коэффициентами усиления K_1, K_2, K_3, ..., K_n общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов.

Полоса пропускания определяется, как обычно, на уровне 0,7 от максимального значения коэффициента усиления по резонансной кривой контура.

Избирательность усилителя характеризует его способность выделять полезный сигнал из совокупности различных сигналов и помех.

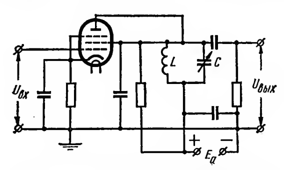


Рис. 103. Схема резонансного усилителя с непосредственным включением контура

Колебательный контур в анодную цепь лампы включается непосредственно или с помощью трансформаторной (автотрансформаторной) схемы. Настройку контура обычно осуществляют плавным изменением емкости конденсатора, входящего в колебательный контур.

Схема резонансного усилителя с непосредственным (полным) включением контура в анодную цепь показана на рис. 103. Если сравнить эту схему со схемой резистивного усилителя низкой частоты (см. рис. 50, *а*), то можно увидеть их полную аналогию. Все детали этих схем имеют одинаковое назначение, только вместо сопротивления анодной нагрузки $R_а$ в схему включен параллельный колебательный контур *LC*. Физические процессы в этой схеме также аналогичны процессам в усилителе низкой частоты. Отличием является то, что на сетку лампы усилителя подается напряжение меньшей амплитуды и более высокой частоты.

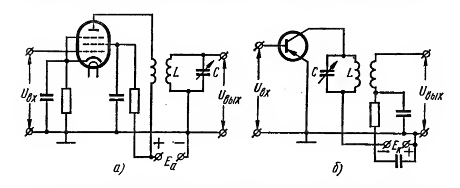


Рис. 104. Схемы резонансных усилителей с трансформаторным включением контура:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

Недостатком этой схемы является то, что конденсатор *С* контура находится под постоянным анодным напряжением и его приходится изолировать от корпуса. Пентод шунтирует колебательный контур, уменьшает добротность и ухудшает его избирательные свойства. Для ослабления шунтирующего действия лампы в резонансном усилителе применяют пентод с большим внутренним сопротивлением.

В схеме резонансного усилителя с трансформаторным включением контура (рис. 104, *а*) конденсатор *С* не находится под постоянным анодным напряжением. При этом шунтирующее действие лампы на колебательный контур уменьшается. В схеме резонансного усилителя на транзисторе (рис. 104, *б*) колебательный контур включен непосредственно в цепь коллектора. Так как входное сопротивление следующего каскада на транзисторе мало, то для согласования сопротивлений применяют трансформаторную связь контура со входом следующего каскада.

Резонансный усилитель может оказаться в неустойчивом состоянии, т. е. в нем может возникнуть самовозбуждение. Причиной само-

возбуждения является паразитная обратная связь через проходную емкость. Для получения наиболее устойчивого усиления применяют лампу с большой крутизной и малой проходной емкостью.

Полосовой усилитель. На рис. 105, *а* изображена схема усилителя, у которого анодной нагрузкой является полосовой фильтр, на рис. 105, *б*—аналогичная схема на транзисторе. Полосовой фильтр позволяет увеличить полосу пропускания резонансной системы путем увеличения

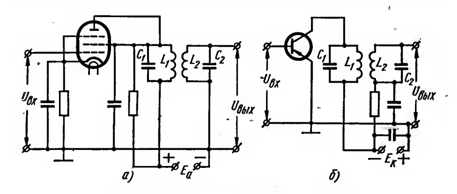


Рис. 105. Схемы полосовых усилителей:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

связи между контурами. Так как резонансная кривая резонансной системы имеет крутые скаты и по форме приближается к прямоугольнику, усилитель имеет резко ограниченную полосу пропускания.

Контрольные вопросы

1. Как осуществляется коррекция частотной характеристики в широкополосном усилителе?
2. Объясните принцип действия усилителя постоянного тока.
3. Объясните принцип действия однополупериодного фазочувствительного усилителя.
4. Как работает двухполупериодный фазочувствительный усилитель?
5. Нарисуйте схему и объясните принцип действия фазочувствительных усилителей на транзисторах.
6. В чем заключается основное отличие резонансного усилителя от резистивного усилителя низкой частоты?
7. Перечислите параметры, характеризующие резонансный усилитель.

Глава VIII
ГЕНЕРАТОРЫ

Во многих радиотехнических устройствах для получения колебаний высокой частоты применяют электронные генераторы, являющиеся преобразователями энергии постоянного тока или тока промышленной частоты в энергию тока и напряжения заданной частоты и формы. Различают генераторы синусоидального и несинусоидального напряжения (например, прямоугольной или пилообразной формы). Электронные генераторы могут быть выполнены на транзисторах, электронных лампах, туннельных диодах и других приборах.

§ 41. ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для получения переменного синусоидального напряжения высокой частоты служат различные схемы автогенераторов (генераторов с самовозбуждением). Рассмотрим работу автогенератора на примере схемы, приведенной на рис. 106, *а*. При замыкании ключа K в анодной цепи лампы протекает ток, который заряжает конденсатор колебательного контура. В контуре возникают свободные колебания, частота которых определяется формулой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_к C_к}} .$$

Так как реальный колебательный контур обладает активным сопротивлением, то необходимо пополнять потери энергии на этом сопротивлении. Это достигается следующим образом. В катушке $L_к$ протекает переменный ток заряда и разряда конденсатора. При этом в катушке $L_с$ индуктируется переменная э. д. с., воздействующая на сетку лампы и вызывающая пульсации анодного тока. Пульсирующий ток содержит постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая тока поддерживает колебания в контуре, и они становятся незатухающими.

В схеме имеется обратная связь: анодная цепь воздействует на цепь сетки. Для возбуждения незатухающих колебаний нужно, чтобы обратная связь была положительной. При этом переменное напряжение, которое создается на контуре переменной составляющей анодного тока, совпадает по фазе с напряжением свободных колебаний. Если же обратная связь будет отрицательной, то колебания, возникшие в контуре, быстро затухнут и самовозбуждения схемы не получится. Можно показать, что при работе схемы переменные напряжения на аноде и сетке окажутся сдвинутыми по фазе на 180°. Это является одним из условий самовозбуждения (условие баланса фаз). В схеме оно легко обеспечивается переключением концов одной из катушек, обычно катушки обратной связи $L_с$.

Значение фазовых соотношений можно пояснить на примере механических колебаний. Если подталкивать маятник или грузик, подве-

шениый иа интке, в такт с его собствеииыми колебаииями, но иавстречу движеиию, то колебаиия прекратятся. Чтобы раскачать маятиик, следует подталкивать его в такт колебанням н в направлеинн его двнжеиня. Для возбуждеиия колебаннй необходнмо также выполиить условня балаиса амплнтуд, т. е. обеспечить достаточно сильиую обратную связь. Прн слабой связи амплнтуда переменной составляющей аиодного тока слншком мала и потери энергнн в контуре не компенснруются.

О наличнн колебаний в контуре судят при помощн иидикатора, иапример лампочкн от карманного фонаря, соеднненной с внтком провода. В внтке нидуктируется переменная э. д. с., и лампочка загорается. Частота колебаннй генератора может изменяться кондеисатором переменной емкостн $C_к$.

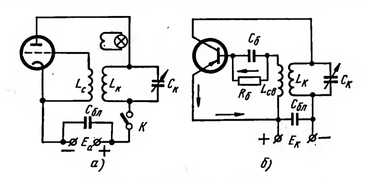


Рис. 106. Схемы автогенератора:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

В рассмотреиной схеме обратиая связь обеспечивается взаимной индуктивностью катушек $L_к$ и $L_с$. Поэтому даиная схема иазывается схемой автогеиератора с индуктнвиой обратиой связью. Схема может быть выполнена н на траизнсторе (рис. 106,*б*). Фнзическне процессы аналогнчны процессам в ламповой схеме. Режнм работы траизнстора подбнрается прн помощи сопротивлеиня $R_б$, на котором за счет постоянной составляющей тока базы создается напряжеине смещення на базу.

Существует миого разновндностей схем автогенераторов. Онн отлнчаются способами пнтаиня лампы нлн транзистора (последовательное илн параллельное) н способом обратиой связн (нндуктивная, автотрансформаторная, емкостная н др.).

В схемах, показанных на рнс. 106, лампа (транзнстор), коитур и источннк пнтання включены последовательно; это схемы последовательного пнтання. В схемах параллельного пнтання (рнс. 107,*а*; 108,*а*) лампа н колебательиый коитур подключеиы к аиодному источиику параллельно. Прн этом коитур не находнтся под постоянным анодиым иапряженнем, которое для мощиых ламп составляет тысячн вольт. Настройка контура безопасиа для оператора.

Пульсирующий анодный ток лампы разделяется на две цепи. Через конденсатор $C_р$ в колебательный контур протекает переменная составляющая. Постоянный ток в этой цепи не протекает, этому препятствует

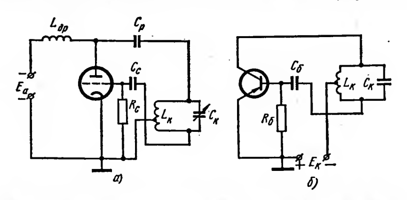


Рис. 107. Схемы генераторов с автотрансформаторной обратной связью:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

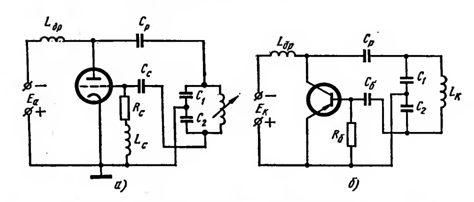


Рис. 108. Схемы генераторов с емкостной обратной связью:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

конденсатор $C_р$. Дроссель $L_{др}$ является препятствием для переменной составляющей тока. Через этот дроссель и источник анодного питания $E_а$ протекает постоянная составляющая тока. В схеме, изображенной на рис. 108,*б*, транзистор и колебательный контур включены параллельно по отношению к источнику питания коллекторной цепи.

Трехточечные схемы

Рассмотрим схемы генераторов с автотрансформаторной и емкостной обратной связью. В генераторе с автотрансформаторной связью (рис. 107, *а*) напряжение обратной связи снимается с части катушки кон-

тура $L_к$. Необходимая фаза обратной связи достигается тем, что провод, идущий от катода (эмиттера), подключен к среднему выводу контурной катушки, а провода от сетки и анода (базы и коллектора) подключены к концам катушки. Переменные напряжения на сетке и аноде сдвинуты по фазе на 180°. В схеме с емкостной связью (рис. 108,*б*) напряжение обратной связи снимается с конденсатора C_2. Изменение частоты осуществляется изменением индуктивности, например, при помощи вариометра. В схемах с автотрансформаторной и емкостной связями контур подключают к лампе или транзистору тремя точками, поэтому такие схемы называют *трехточечными*.

Во всех схемах автогенераторов переменное напряжение на сетке лампы или базе транзистора получается за счет обратной связи. В гене-

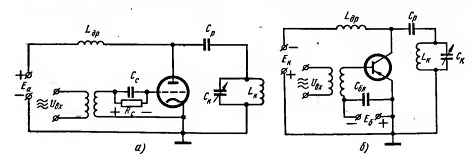


Рис. 109. Схемы генераторов с внешним возбуждением:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

раторах с внешним, или независимым, возбуждением это напряжение подается от другого устройства, например от автогенератора. По существу генератор с внешним возбуждением является усилителем электрических колебаний.

Рассмотрим работу генератора с внешним возбуждением (рис. 109, *а*). Под действием переменного напряжения на сетке анодный ток лампы становится пульсирующим. Переменная составляющая этого тока протекает через конденсатор $C_р$ в контур и пополняет потери энергии в нем. Чтобы колебания в контуре имели большую амплитуду, необходимо настроить контур в резонанс с частотой переменного напряжения на сетке. Для настройки контура служит конденсатор переменной емкости $C_к$. Аналогичные процессы происходят в схеме, выполненной на транзисторе (рис. 109,*б*).

Схема генератора с внешним возбуждением имеет много общего со схемой резонансного усилителя. Отличаются они режимом работы. Резонансные усилители, как правило, применяют в маломощных устройствах, где к. п. д. не имеет значения. Поэтому резонансный усилительный каскад обычно работает в режиме А. Генератор с внешним возбуждением является частью мощного устройства, например усилительной ступенью передатчика. Здесь необходимо обеспечить режим работы с высоким к. п. д.

Генераторы типа *RC*

Для получения сниусондальных колебанний нвзкой частоты иебольшой мощиостн широко примеияют генераторы тнпа *RC*, выполияемые иа рензнсторах *R* н коидеисаторах *C*. Для иизкочастотных колебаиий автогеиераторы с колебательными контурами *LC* неудобны. Коитур должен иметь большую нндуктнвность н большую емкость, детали контура получаются громоздкими, а перестройка частоты затрудиительиа.

Схема простейшего генератора *RC* показана иа рнс. 110. Ее можно рассматрнвать как схему уснлнтельного резисторного каскада, в которой при помощн цепочки *RC* обеспечивается обратиая связь. Для геиерации колебаиий, т. е. самовозбуждения схемы, иеобходимо, чтобы обратная связь была положительной. Напряжеиие, поданное с выхода уснлителя, должно совпадать по фазе с входным напряжеиием.

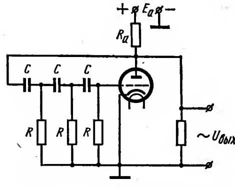


Рис. 110. Простейшая схема генератора *RC*

В рассматрнваемой схеме это достигается следующим образом. Известио, что в уснлительиом каскаде переменные напряжеиия иа сетке н аноде протнвоположны по фазе. Другими словамн, каскад измеияет фазу перемеииого иапряжеиия иа 180°. Это отиосится к ианболее распространеиным схемам с общим катодом н общнм эмиттером, а следовательно, и к даиной схеме. Еще один поворот фазы иа 180° обеспечивает цепочка *RC*, изываемая *фазовращающей*. Общнй сдвиг по фазе составнт 360°, т. е. иапряжеиие, подаиное с выхода, совпадает по фазе с входным иапряжением.

В трехзвениой цепочке каждое звеио должио дать сдвиг по фазе на $\frac{180}{3} = 60°$. Этот фазовый сдвиг будет обеспечен только на определениой частоте, определяемой по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{3} R C}.$$

С уменьшением емкости или сопротивлеиия частота колебаиий генератора увеличнвается. Переключением или плавиым измеиением сопротивлеиий илн емкостей можно измеиять частоту геиератора.

Вместо фазовращающей цепочки можно примеиить второй усилительиый каскад (рнс. 111). Частота колебаиий в этой схеме определяется формулой

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}.$$

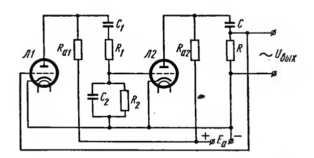


Рис. 111. Двухкаскадный генератор RC

Генераторы RC просты, детали их имеют малые размеры и массу. Они стабильны в работе, дают возможность изменять частоту в широких пределах (от единиц герц до десятков килогерц) и мало искажают синусоидальную форму напряжения. Эти генераторы получили широкое распространение, особенно в радиоизмерительной аппаратуре.

§ 42. ГЕНЕРАТОРЫ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для работы некоторых радиоэлектронных схем необходимо периодически меняющееся напряжение пилообразной формы. Генераторы пилообразного напряжения применяют, например, для развертки луча в электроннолучевой трубке, измерения временных интервалов, создания временной задержки и т. п. Напряжение пилообразной формы обычно создается в результате периодического заряда и разряда конденсатора.

В качестве примера рассмотрим схему, показанную на рис. 112,*а*. При включении источника питания конденсатор C заряжается через сопротивление R. Время заряда определяется постоянной времени цепи $\tau = RC$. Сопротивление выбирают большим и заряд происходит сравнительно медленно. Как только напряжение на конденсаторе достигает потенциала зажигания неоновой лампы, она загорается. Конденсатор быстро разряжается через лампу, напряжение на нем падает, и лампа гаснет. Затем процесс повторяется.

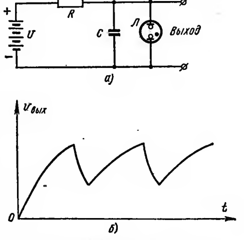


Рис. 112. Генератор пилообразного напряжения на неоновой лампе:
а — схема, *б* — график выходного напряжения

Эта схема проста, но она может лишь приближенно обеспечить нужную форму напряжения. Дело в том, что напряжение должно нарастать прямо пропорционально времени, т. е. по линейному закону, а заряд конденсатора происходит по экспоненциальной кривой (рис. 112,*б*). В цепи с большой постоянной времени можно использовать небольшой почти прямолинейный участок этой кривой. Однако такой способ нерационален. Как показывают расчеты, при напряжении источника питания, равном, например, 100 В, можно получить напряжение, изменяющееся линейно в пределах от нуля до 5—6 В. Поэтому на практике применяют более сложные схемы

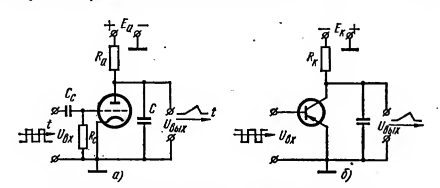


Рис. 113. Схемы генераторов пилообразного напряжения:
а — на электронной лампе, *б* — на транзисторе

В телевизионных приемниках для получения пилообразного напряжения служат схемы, выполненные на электронных лампах или транзисторах. Рассмотрим работу схемы с разрядной лампой (рис. 113, *а*). На сетку лампы подаются импульсы напряжения прямоугольной формы, полученные от мультивибратора или блокинг-генератора. Когда напряжение на сетке отрицательно (положительный импульс отсутствует), лампа заперта и конденсатор C медленно заряжается через резистор R_a. Цепь заряда: плюс источника E_a, резистор R_a, конденсатор C, корпус, минус источника E_a. Сопротивление R_a подобрано так, чтобы заряд происходил медленно и напряжение на конденсаторе нарастало постепенно.

В тот момент, когда на сетку лампы подан положительный импульс напряжения, лампа открывается и конденсатор C быстро разряжается через сравнительно небольшое внутреннее сопротивление лампы. Напряжение на конденсаторе резко уменьшается. Таким же образом работает схема с разрядным транзистором (рис. 113,*б*), но транзистор *p-n-p* заперт положительным напряжением на базе и открывается отрицательным импульсом. Обе схемы могут дать пилообразное напряжение сравнительно небольшой амплитуды, значительно отклоняющееся от линейного закона. Для улучшения линейности приходится принимать специальные меры, например включать в схему дополнительной транзистор.

Хорошие результаты дают схемы с отрицательной обратной связью, например схема с линейным разрядом конденсатора через пентод (рис. 114). Между анодом и управляющей сеткой пентода включен конденсатор C, являющийся элементом обратной связи. Разряд этого конденсатора используется для получения линейно изменяющегося напряжения.

В исходном положении на защитную (третью) сетку пентода подается большое отрицательное напряжение $E_{с.з}$, тока в анодной цепи нет. Управляющая сетка соединена с плюсом анодного источника $E_а$ через большое сопротивление $R_с$. В цепи управляющей сетки проте-

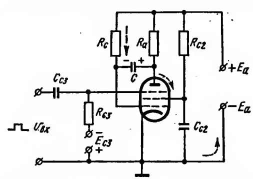


Рис. 114. Схема генератора пилообразного напряжения на пентоде

кает ток, который создает на резисторе $R_с$ падение напряжения. Резистор подобран так, что напряжение на управляющей сетке близко к нулю. На экранирующую сетку подается постоянное напряжение через резистор $R_{с2}$.

Левая обкладка конденсатора C соединена с управляющей сеткой пентода, напряжение на которой почти равно нулю. Можно считать эту точку схемы заземленной, т. е. соединенной с минусом анодного источника. Правая обкладка конденсатора C через резистор анодной нагрузки $R_а$ соединена с плюсом анодного источника. Так как анодный ток пентода равен нулю, то на резисторе $R_а$ нет падения напряжения и конденсатор C можно считать включенным между минусом и плюсом анодного источника.

Следовательно, в исходном режиме конденсатор заряжен до напряжения анодного источника $E_а$. Пусковой импульс положительной полярности подается на защитную сетку. Он отпирает лампу, в ее анодной цепи появляется ток, на резисторе $R_а$ возникает падение напряжения, а напряжение на аноде лампы уменьшается. Так как напряжение на конденсаторе мгновенно измениться не может, то понижение потенциала анода мгновенно передается на управляющую сетку и на ней возникает отрицательное напряжение, близкое к потенциалу запирания лампы.

Затем конденсатор C начинает разряжаться (точнее, перезаряжаться) через промежуток анод — катод лампы, анодный источник и резис-

тор R_c. Направленне тока разряда конденсатора показано на рнс. 114 пунктнрнымн лнниямн со стрелками. В процессе разряда конденсатора потенцнал его левой обкладки, равный потенцналу управляющей сеткн, повышается, а потенцнал правой обкладки, равный потенциалу анода лампы, поннжается. Разряд конденсатора продолжается до тех пор, пока на защитной сетке действует положнтельный нмпульс входного напряжения.

Еслн бы в цепн не было отрицательной обратной связн, разряд происходнл бы по экспоненцнальному закону. Но как только в анодной цепи возннкает ток, в схеме начннает действовать отрицательная обратная связь по напряженню. Любое нзмененне напряжения на аноде лампы через конденсатор передается на управляющую сетку. Это равноценно увелнченню постоянной временн цепн разряда конденсатора. Закон нзменения анодного напряження блнзок к линейному. На рис. 115 показаны графики нзмененя напряжения на защнтной сетке, аноде лампы н управляющей сетке. Как вндно нз графика, напряженне на аноде лампы нзменяется в большнх пределах.

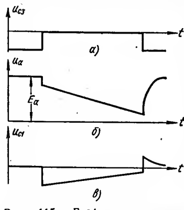


Рис. 115. Графики измеиения напряжений в схеме генератора иа пеитоде:
а — на защитной сетке, б — на аноде, в — на управляющей сетке

В генераторе пнлообразного напряжения, схема которого была показана на рнс. 114, рабочий процесс разряда конденсатора продолжается лншь до тех пор, пока на защнтной сетке действует положнтельный нмпульс входного напряжения. Другимн словамн, нмпульсы входного напряжения должны нметь достаточную длнтельность.

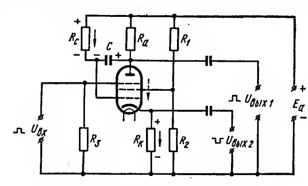
Существуют схемы генераторов лннейно изменяющегося напряження, которые запускаются коротккмн нмпульсамн. В такнх схемах момент окончания разряда конденсатора определяется параметрамн цепи положительной обратной связи. Если такая цепь создается дополннтельной лампой, генератор называется *санатронным*. Еслн же в этой цепн нспользуется катодное сопротнвление, генератор называется *фантастронным*.

Рассмотрнм схему фантастронного генератора на пентоде (рнс. 116). Управляющая сетка пентода подключена к плюсу анодного нсточника E_a через резнстор R_c. В нсходном состояннн на этом резисторе за счет тока управляющей сеткн создается падение напряжения. Оно вычнтается нз напряжения анодного нсточннка, н в результате на управляющей сетке нмеется лншь небольшой положнтельный по отношенню к катоду потенцнал.

На экранную сетку подано положительное напряжение. Оно снимается с резнстора R_2, который вместе с резнстором R_1 образует делнтель напряжения. В цепн экранной сеткн протекает ток, создающий

на резисторе $R_к$ падеине напряжеиня. Мниус этого напряжеиия через резистор $R_з$ подается иа защитиую сетку. Это отрнцательное напряжение запнраeт лампу по аиодиому току. В нсходном состояиин аиодиый ток лампы равен нулю н иа резисторе $R_а$ нет падення напряження. При этом потенцнал аиода равен потенцналу положительиого полюса источннка анодного иапряження $E_а$.

Напряженне иа аиоде пеитода (т. е. между анодом и катодом) максимальио. Оно меньше напряжеиня анодиого нсточинка $E_а$ на велнчну падеиня напряжения иа резисторе $R_к$. Напряжеиие иа кондеисаторе



Рнс. 116. Схема фантастронного генератора

C почти равио напряжеиию на аиоде лампы. Так как аиодиого тока иет, то правую (на схеме) пластиину коидеисатора можио счнтать подключеиной непосредствеиио к плюсу анодиого нсточинка. Левая же пластина соединена с управляющей сеткой, которая имеет иебольшой положнтельный потенцнал по отношенню к катоду.

Исходное состояине схемы является устойчивым. В этом состоянии схема геиератора может иаходиться иеограннченно долго. Для запуска схемы иа защитиую сетку подается положнтельиый по отношению к катоду нмпульс напряження, отпнрающий лампу. В аиодиой цепи возникает ток. На резнсторе $R_а$ появляется падеиие напряжеиия, а напряженне иа аноде лампы уменьшается.

Через кондеисатор *C* это измеиеиие напряження передается иа управляющую сетку. Напряжеине иа ией умеиьшается, т. е. стаиовится отрицательиым по отиошеиию к катоду. Управляющая сетка умеиьшает поток электроиов, двнжущихся с катода. Поэтому умеиьшается ток экраниой сетки и падеине напряжеиия иа резнсторе $R_к$. Следовательно, умеиьшается отрнцательиое напряженне на защитной сетке н анодный ток возрастает.

Этот процесс развнвается лавниообразно и происходнт очеиь быстро, скачком. Прн некотором зиачеиии аиодиого тока, величииа которого завнснт от параметров схемы, лавниообразный процесс прекращается. Новое состоянне схемы по сравиенню с исходным состояинем характеризуется умеиьшением напряжеиия на аиоде и катодном резнсторе $R_к$.

Далее начинается рабочий процесс схемы. Так как потенциал анода уменьшился, то конденсатор C, правая пластина которого подключена к аноду лампы, начинает разряжаться. Цепь разряда конденсатора: правая (положительная) пластина, промежуток анод — катод лампы, резистор $R_к$, земля (минус анодного источника), анодный источник $E_а$, сопротивление $R_с$, левая (отрицательная) пластина. Направление тока разряда показано на рисунке линиями со стрелками.

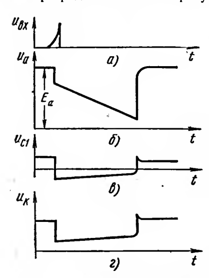


Рис. 117. Графики напряжений в схеме фантастронного генератора:
а — на входе схемы, б — на аноде, в — на управляющей сетке, г — на катоде (по отношению к корпусу)

В процессе разряда конденсатора в схеме действует отрицательная обратная связь. Всякое уменьшение разрядного тока конденсатора сопровождается уменьшением падения напряжения на резисторе $R_с$. При этом уменьшается отрицательный потенциал на управляющей сетке и анодный ток возрастает. Это приводит к увеличению падения напряжения на резисторе $R_а$ и уменьшению потенциала анода. Разрядный ток конденсатора должен увеличиться.

Как уже говорилось ранее, отрицательная обратная связь обеспечивает постепенное и, что особенно важно, линейное изменение напряжения на аноде лампы. По сравнению с предыдущей схемой потенциал анода изменяется еще в больших пределах. По линейному закону изменяется и напряжение на резисторе $R_к$.

Разряд конденсатора заканчивается, когда анодный ток достигает максимального значения, определяемого типом лампы. Разрядный ток через резистор $R_с$ не протекает, с этого резистора не подается отрицательное напряжение на управляющую сетку. Положительный потенциал на управляющей сетке увеличивает ток в цепи экранной сетки. Увеличивается падение напряжения на резисторе $R_к$, и на защитной сетке вновь появляется отрицательное напряжение. Процесс нарастает быстро, скачком, и лампа вновь запирается по анодному току. Схема приходит в исходное состояние. На рис. 117 показаны графики напряжений в схеме фантастронного генератора. Из графиков видно, что линейно изменяющееся напряжение можно получить в различных точках схемы.

§ 43. ГЕНЕРАТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Во многих радиотехнических устройствах используют импульсный режим работы. В этом режиме токи и напряжения, действующие в аппаратуре, имеют вид кратковременных импульсов, отделенных друг

от друга сравнительно большими промежутками времени. Импульсная техника играет огромную роль в развитии современной радиотехники.

Импульсные устройства применяют в аппаратуре радиорелейной связи и радиолокации, телевидении, электронных математических машинах, различных устройствах военной техники. Все более широкое распространение получают импульсные методы и во многих других отраслях народного хозяйства при различных измерениях, подсчете и сортировке изделий, исследованиях строения вещества, в медицине. Большое значение имеет импульсная техника для автоматизации производственных процессов.

Рис. 118. Импульсы тока

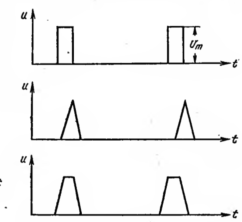


Рис. 119. Видеоимпульсы напряжения различной формы

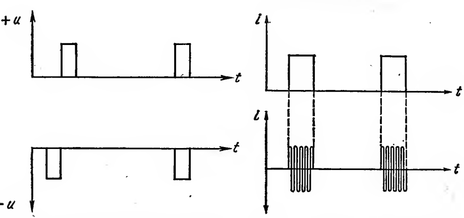


Рис. 120. Видеоимпульсы напряжения положительной и отрицательной полярности

Рис. 121. Видео- и радиоимпульсы

На рис. 118 показан импульс постоянного тока. Так же может быть изображен импульс постоянного напряжения. Импульсы постоянного тока или напряжения называются *видеоимпульсами*. Видеоимпульсы могут иметь различную форму. На рис. 119 показаны прямоугольные,

треугольные и трапецеидальные импульсы напряжения, а на рис. 120 — импульсы положительной и отрицательной полярности. Во многих случаях полярность импульсов имеет большое значение. Кроме видеоимпульсов в аппаратуре могут возникать *радиоимпульсы*. Это колебания высокой частоты, огибающая которых изменяется по закону видеоимпульсов (рис. 121).

Параметры импульсов

Импульсы характеризуются следующими параметрами: длительностью, периодом повторения, скважностью, амплитудным и средним значением. Большую роль играет закон нарастания и убывания импульса (фронт и срез).

Длительностью импульса $t_и$ называется время от момента его возникновения до момента исчезновения (см. рис. 118). Длительность импульсов, применяемых в технике, может быть различна — от долей секунды до долей микросекунды. Время между окончанием одного импульса и началом другого называется *паузой*.

Промежуток времени от момента появления одного импульса до момента появления другого называется *периодом повторения импульсов*. Период повторения T равен сумме длительности импульса $t_и$ и длительности паузы $t_п$. Величина, обратная периоду повторения, называется *частотой повторения* или *частотой следования импульсов*.

Скважностью импульсов Q называется отношение периода повторения к длительности импульса. Скважность выражают отвлеченным числом ($Q = \frac{T}{t_и}$). Пауза между импульсами бывает во много раз больше длительности импульса, поэтому скважность значительно больше единицы (сотни или тысячи). Величина, обратная скважности, называется *коэффициентом заполнения* и обозначается буквой K.

Амплитуда импульса — это наибольшее его значение ($I_{макс}$, $U_{макс}$).

Чтобы найти *среднее значение импульса* тока, напряжения или мощности, нужно ток, напряжение или мощность за время импульса распределить равномерно на весь период. Так как промежутки между импульсами значительно больше, чем их длительность, то среднее значение импульса получается во много раз меньше амплитудного. Источник, создающий энергию импульса, работает непрерывно. Его энергия накапливается в специальном устройстве — накопителе энергии — и отдается за короткое время длительности импульса. Следовательно, при сравнительно небольшой мощности источника можно получить большую мощность кратковременного импульса.

Мощности импульса $P_и$ и источника $P_{ср}$ связаны между собой соотношением:

$$P_и = Q P_{ср}.$$

При высокой скважности мощность импульса может достигать огромных значений.

В любой схеме аппаратуры имеются реактивные элементы — индуктивности и емкости. Поэтому нарастание и убывание импульса не может происходить мгновенно и прямоугольный импульс практически имеет вид, показанный на рис. 122. Время нарастания импульса $t_{фр}$ определяется участком ab, который называется *передним фронтом* или просто *фронтом*, время спадания $t_{ср}$ — участком cd, который называется *срезом* или *спадом*.

Как видно из рис. 122, длительность фронта $t_ф$ представляет собой отрезок времени, в течение которого импульс нарастает от 0,1 до 0,9 амплитудного значения U_m, а длительность среза $t_{ср}$ — время убывания импульса от 0,9 до 0,1 U_m. Длительность импульса $t_и$ отсчитывается на уровне 0,1 от U_m.

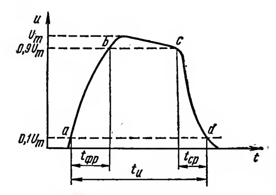


Рис. 122. Прямоугольный импульс напряжения с учетом влияния реактивных свойств цепи

Как правило, форма импульса на выходе устройства отличается от формы импульса на входе. Аппаратура должна быть рассчитана так, чтобы искажения не превышали допустимых норм. Чем короче импульсы, тем труднее выполнить эти условия. Теория и практика показывают, что чем шире полоса пропускания аппаратуры, тем более короткие импульсы эта аппаратура способна воспроизводить без искажений.

Полоса пропускания и длительность импульса прямоугольной формы связаны следующим (приблизительным) соотношением:

$$\Delta F = \frac{1 \div 3}{t_и},$$

где ΔF — полоса пропускания аппаратуры, Гц; $t_и$ — длительность импульса, с.

На практике удобнее выражать полосу пропускания в мегагерцах, а длительность импульса в микросекундах.

Тогда

$$\Delta F\,(МГц) = \frac{1 \div 3}{t_и\,(мкс)}.$$

Легко подсчитать, что при $t_и = 1$ мкс полоса пропускания должна быть $1 \div 3$ МГц. Широкая полоса пропускания является одной из особенностей импульсных устройств.

Ограничители

Для получения импульсов напряжения прямоугольной формы существует много различных устройств, например, их можно получить из синусоидального напряжения при помощи ограничителя. В качестве ограничителей применяют электронные лампы и полупроводниковые приборы, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику. Чаще всего используют различные варианты схем диодных ограничителей.

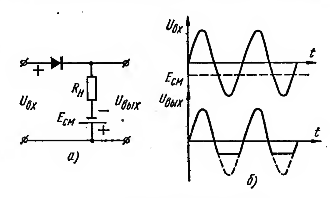


Рис. 123. Диодный ограничитель:
а — схема, *б* — графики напряжений

Для примера рассмотрим схему, показанную на рис. 123,*а*. На вход схемы подается напряжение синусоидальной формы. Сначала представим себе, что в этой схеме нет источника смещения $E_{см}$. В этом случае напряжение на нагрузочном резисторе $R_н$, и, следовательно, на выходе схемы появлялось бы только в положительные полупериоды входного напряжения. В отрицательные полупериоды диод был бы заперт и напряжение на выходе было бы равно нулю. Однако источник смещения $E_{см}$ поддерживает диод в открытом состоянии и в течение некоторой части отрицательного полупериода. Лишь в те моменты, когда входное напряжение оказывается больше $E_{см}$, диод будет заперт. В результате отрицательные полупериоды на выходе будут срезаны, ограничены (рис. 123,*б*). Получаются отрицательные импульсы напряжения почти прямоугольной формы. Величина $E_{см}$ определяет важную характеристику ограничителя — *порог ограничения*. Разработано много вариантов схем диодных ограничителей, которые могут пропускать импульсы только одной полярности, ограничивать их по максимуму и минимуму и выполнять другие задачи.

Мультивибраторы

В качестве генераторов прямоугольных импульсов напряжения очень часто применяют мультивибраторы. Колебания прямоугольной формы содержат множество гармоник. Слово «мультивибратор» и означает «генератор множества колебаний» (от латинских слов «multum» — много и «vibro» — колеблю). Прямоугольные импульсы напряжения, полученные с выхода мультивибратора, используют для запуска или переключения различных схем. В зависимости от назначения мультивибратор может работать в трех различных режимах: автоколебательном, режиме синхронизации и деления частоты, ждущем режиме.

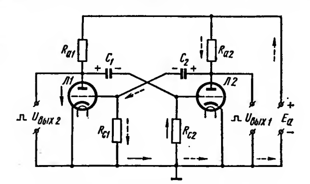


Рис. 124. Схема мультивибратора на электронных лампах

Мультивибратор в автоколебательном режиме. Рассмотрим схему мультивибратора на электронных лампах, работающую в автоколебательном режиме (режиме самовозбуждения, рис. 124). Схема представляет собой двухкаскадный резистивный усилитель с положительной обратной связью. Обратная связь осуществляется за счет соединения выхода одного каскада с входом другого через конденсаторы C_1 и C_2. Если лампы *Л1* и *Л2* одинаковы и сопротивления и емкости обоих каскадов тоже одинаковы ($R_{a1} = R_{a2}$; $R_{c1} = R_{c2}$ и $C_1 = C_2$), то мультивибратор называют *симметричным*.

Обычно в схеме мультивибратора используют двойной триод. Рассмотрим принцип действия такой схемы. При включении питания через лампы *Л1* и *Л2* протекают токи. В симметричной схеме эти токи должны быть совершенно одинаковыми. Но из-за разброса параметров и различных флюктуаций (тепловых изменений) ток любой из ламп может измениться.

Пусть немного увеличится ток i_{a1} лампы *Л1*. Это вызовет увеличение падения напряжения на резисторе R_{a1}. Напряжение на аноде *Л1* при этом уменьшится. (В любой момент сумма напряжений на резисторе R_{a1} и аноде *Л1*, точнее между анодом и катодом, равна напряжению источника анодного питания.) Конденсатор C_1 начнет разряжаться. Ток разряда пройдет по цепи: левая (положительная) пластина кон-

денсатора C_1, лампа *Л1*, резистор R_{c2}, правая (отрицательная) пластина конденсатора. Направление тока разряда показано на рисунке сплошной линией со стрелкой.

На резисторе R_{c2} создается падение напряжения. Отрицательный потенциал на сетке *Л2* уменьшит ее анодный ток. Следовательно, уменьшится и падение напряжения на резисторе R_{a2}, а напряжение на аноде *Л2* увеличится. Это вызовет заряд конденсатора C_2. Ток заряда пройдет от плюса анодного источника E_a через резистор R_{a2}, конденсатор C_2, резистор R_{c1} к минусу источника. Направление тока заряда показано на рисунке пунктирными линиями со стрелками.

Положительный потенциал на сетке *Л1* вызовет еще большее увеличение ее анодного тока. Так, даже ничтожное увеличение тока i_{a1} приведет к дальнейшему его увеличению и уменьшению тока i_{a2}. Этот процесс нарастает лавинообразно. В результате анодный ток лампы *Л1* достигнет максимума, а лампа *Л2* запрется. Происходит *опрокидывание схемы*. Длительность процесса опрокидывания зависит от постоянной времени цепи и обычно составляет доли микросекунды.

Лампа *Л2* будет заперта до тех пор, пока не закончится разряд конденсатора C_1. По мере разряда конденсатора разрядный ток и падение напряжения на резисторе R_{c2} уменьшатся и напряжение на сетке *Л2* постепенно достигнет величины, при которой она откроется. Возникнет лавинообразный процесс обратного направления.

При появлении анодного тока лампы *Л2* падение напряжения на резисторе R_{a2} уменьшит напряжение на аноде *Л2*. Теперь будет разряжаться конденсатор C_2. Ток разряда создаст падение напряжения на резисторе R_{c1}. Отрицательный потенциал на сетке лампы *Л1* уменьшит ее анодный ток и падение напряжения на резисторе R_{a1}. Напряжение на аноде *Л1* увеличится. Будет заряжаться конденсатор C_1 через резистор R_{c2}. Положительный потенциал на сетке *Л2* вызовет дальнейшее увеличение ее анодного тока. Ток i_{a2} будет нарастать, а ток i_{a1} уменьшаться, и очень быстро лампа *Л1* окажется запертой. Произойдет новое опрокидывание схемы.

Таким образом, схема мультивибратора может находиться в одном из двух состояний, но ни одно из них не является устойчивым. Режим работы схемы подобран так, что опрокидывание происходит значительно быстрее, чем разряд конденсаторов C_1 и C_2 через сравнительно большие сопротивления R_{c1} и R_{c2}. Поэтому мультивибратор будет генерировать импульсы напряжения почти прямоугольной формы.

На рис. 125 показаны графики напряжений на сетках и анодах ламп симметричного мультивибратора. В процессе автоколебаний на сетках ламп поочередно возникает отрицательное напряжение, запирающее лампу. В соответствии с этим напряжения на анодах также поочередно возрастают и уменьшаются.

Как видно из графиков, длительность импульсов равна длительности паузы между ними. Следовательно, скважность импульсов

$$Q = \frac{T}{t_и} = \frac{t_и + t_п}{t_и} = \frac{2t_и}{t_и} = 2.$$

Обычно требуется большее значение скважности, поэтому на практике чаще применяют несимметричные мультивибраторы. В несимметричной схеме электрические цепи ламп *Л1* и *Л2* имеют различные постоянные времени. Поэтому время заряда конденсаторов C_1 и C_2 различно, так же как и время разряда. Если, например, емкость конденсатора C_1 больше, чем емкость конденсатора C_2, то лампа *Л1* будет

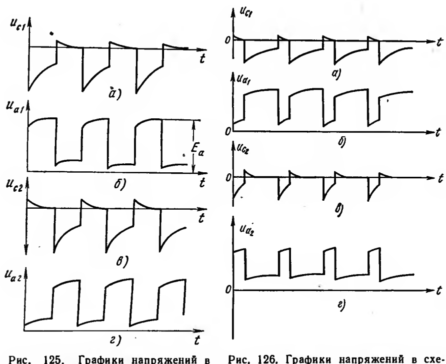


Рис. 125. Графики напряжений в схеме симметричного мультивибратора:
а, б — на сетке и аноде первой лампы, *в, г* — на сетке и аноде второй лампы

Рис. 126. Графики напряжений в схеме несимметричного мультивибратора:
а, б — на сетке и аноде первой лампы, *в, г* — на сетке и аноде второй лампы

заперта в течение большего промежутка времени, чем лампа *Л2*. Графики работы схемы для этого случая имеют вид, показанный на рис. 126.

Существует несколько разновидностей схем мультивибраторов. В схеме, изображенной на рис.124, обратная связь между каскадами осуществляется в анодной цепи (мультивибратор с анодной связью). Но обратная связь может осуществляться и по катодной цепи. Такая схема называется *мультивибратором с катодной связью* (рис. 127).

Эта схема выполнена также на двух лампах *Л1* и *Л2*. Сетка лампы *Л2* заземлена. Между сеткой и катодом лампы включен резистор $R_к$, на котором анодные токи создают падение напряжения.

Предположим, что в какой-то момент времени лампа *Л1* заперта, а лампа *Л2* отперта. Отрицательное напряжение на сетке лампы *Л1* создается током разряда конденсатора *C*, протекающим через лампу *Л2* и резистор R_c. Направление тока разряда показано на схеме линиями со стрелками. По мере разряда конденсатора ток убывает, напряжение на сетке *Л1* растет и достигает такой величины, при которой в цепи анода этой лампы возникает ток. Этот ток протекает через резистор $R_к$ и создает на нем напряжение, минус которого подается на сетку *Л2*.

Анодный ток лампы *Л1* нарастает быстро, что приводит к запиранию лампы *Л2*. При этом на сетке *Л1* возникает положительное

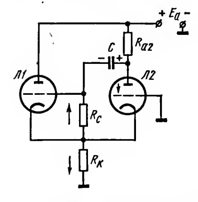


Рис. 127. Схема мультивибратора с катодной связью

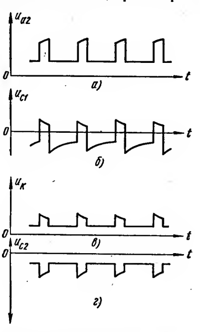


Рис. 128. Графики напряжений в схеме мультивибратора с катодной связью:

а, г — на аноде и сетке второй лампы, *б* — на сетке первой лампы, *в* — на катоде (по отношению к корпусу)

напряжение и появляется сеточный ток. Напряжение на сетке возникает за счет тока заряда конденсатора *C*, который заряжается от источника питания через резистор $R_{а2}$, участок сетка — катод лампы *Л1* и резистор $R_к$.

Так как сопротивление участка сетка — катод при наличии сеточного тока мало (около 1 кОм), то ток заряда, а следовательно, и напряжение на сетке *Л1* быстро уменьшаются. Напряжение на резисторе $R_к$ также уменьшается и достигает такого значения, при котором лампа *Л2* отпирается. При этом уменьшается напряжение на аноде *Л2*, а следовательно, и на сетке *Л1*. Анодный ток лампы *Л1* уменьшается, а напряжение на сетке *Л2* возрастает. Этот процесс заканчивается запиранием лампы *Л1*, т. е. опрокидыванием схемы.

После опрокидывания конденсатор C начинает разряжаться через резистор R_c. Напряжение, возникающее на этом сопротивлении, поддерживает лампу *Л1* в запертом состоянии. Разряд конденсатора происходит медленнее, чем заряд, поэтому мультивибратор будет несимметричным. Графики напряжения в схеме мультивибратора с катодной связью изображены на рис. 128.

Схема мультивибратора на транзисторах показана на рис. 129. Она отличается от схемы на электронных лампах лишь наличием источника смещения на базу $E_б$. Транзисторы открываются при напряжении на базе, равном нулю. При отсутствии

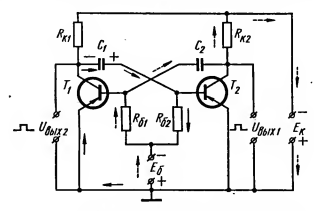


Рис. 129. Схема мультивибратора на транзисторах

$E_б$ случайное небольшое напряжение на базе может открыть транзистор и нарушить нормальную работу схемы. Мультивибратор на транзисторах работает аналогично мультивибратору на электронных лампах. Всякое изменение тока или напряжения на любом участке схемы приводит к лавинообразному процессу и один из транзисторов запирается, а другой отпирается.

Предположим, например, что вследствие случайных тепловых изменений увеличивается ток в цепи коллектора транзистора *Т1*. Следовательно, увеличивается падение напряжения на резисторе $R_{к1}$, а напряжение на коллекторе *Т1* уменьшается. В любой момент сумма напряжений на резисторе $R_{к1}$ и коллекторе транзистора (между коллектором и эмиттером) равна напряжению источника коллекторной цепи $E_к$. Конденсатор C_1 начинает разряжаться. Ток разряда проходит по цепи: правая (положительная) пластина конденсатора C_1, резистор $R_{б2}$, источник смещения $E_б$, транзистор *Т1*, левая (отрицательная) пластина конденсатора C_1. Направление тока разряда показано на схеме сплошной линией со стрелкой.

На резисторе $R_{б2}$ увеличивается падение напряжения. Как видно из схемы, это напряжение оказывается включенным навстречу напряжению смещения на базу $E_б$. Отрицательное напряжение на базе *Т2* уменьшается, следовательно, уменьшается ток коллектора *Т2*. При

этом уменьшается падение напряжения на резисторе $R_{к2}$, а напряжение на коллекторе увеличивается. Это вызывает заряд конденсатора C_2. Ток заряда проходит по цепи: плюс источника $E_к$, источник $E_б$, резистор $R_{б1}$, конденсатор C_2, резистор $R_{к2}$, минус источника $E_к$. Направление тока заряда показано на схеме пунктирными линиями со стрелками.

За счет падения напряжения на резисторе $R_{б1}$ отрицательное смещение на базе *T1* возрастает, а это еще больше увеличивает коллекторный ток транзистора *T1*. Процесс нарастает лавинообразно, и в результате коллекторный ток транзистора *T1* достигает максимума, а транзистор *T2* запирается. В этом состоянии схема находится до тех пор, пока не закончится разряд конденсатора C_1. В процессе разряда конденсатора разрядный ток и напряжение на резисторе $R_{б2}$ уменьшаются, постепенно напряжение на базе *T2* достигает величины, при которой транзистор *T2* открывается и начинается лавинообразный процесс обратного направления (опрокидывание схемы).

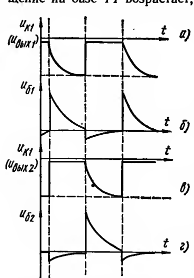


Рис. 130. Графики напряжений в схеме мультивибратора на транзисторах:
а — на коллекторе транзистора *T1* ($U_{вых1}$), *б* — на базе транзистора *T1*, *в* — на коллекторе транзистора *T2* ($U_{вых2}$), *г* — на базе транзистора *T2*

Коллекторный ток транзистора *T2* создает падение напряжения на резисторе $R_{к2}$. На коллекторе *T2* уменьшается напряжение. Начинается разряд конденсатора C_2. Ток разряда создает падение напряжения на резисторе $R_{б1}$. Напряжение смещения и коллекторный ток транзистора *T1* уменьшаются. Напряжение на коллекторе *T1* увеличивается. Начинается заряд конденсатора C_1 через резистор $R_{б2}$. При этом увеличивается отрицательное смещение на базу транзистора *T2* и еще больше возрастает его коллекторный ток. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к тому, что транзистор *T1* оказывается запертым, а коллекторный ток транзистора *T2* достигает максимума. Происходит новое опрокидывание схемы. Описанный процесс повторяется периодически.

На рис. 130 показаны графики напряжений на коллекторах и базах транзисторов в схеме симметричного мультивибратора. При помощи ограничителя можно получить импульсы выходного напряжения почти прямоугольной формы. Частота колебаний, длительность импульсов и форма выходного напряжения зависят от параметров и режима работы схемы. Для мультивибратора на транзисторах (рис. 129), работающего в нормальных температурных условиях, длитель-

ность импульсов может быть приближенно определена по формулам:

$$t_{и1} = 2{,}3\, C_1 R_{б2} \lg \frac{E_б + E_к}{E_б};$$

$$t_{и2} = 2{,}3\, C_2 R_{б1} \lg \frac{E_б + E_к}{E_б},$$

где $E_к$ и $E_б$ — напряжения источников питания.

Частота колебаний мультивибратора (частота повторения импульсов)

$$f = \frac{1}{t_{и1} + t_{и2}}.$$

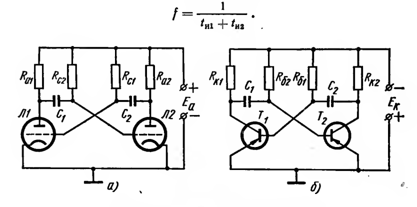


Рис. 131. Схемы мультивибратора:
а — с положительными сетками, *б* — на транзисторах

Для мультивибратора на электронных лампах (триодах) длительность импульсов

$$t_{и1} \approx 2R_{c1} C_2; \quad t_{и2} \approx 2R_{c2} C_1.$$

Подбирая величины емкостей и сопротивлений, можно настроить мультивибратор на частоту от нескольких герц до нескольких десятков килогерц.

Существуют разновидности схем мультивибраторов. В частности, схема мультивибратора на электронных лампах с положительными сетками (рис. 131, *а*) и аналогичная ей схема на транзисторах с подключением базовых резисторов непосредственно к источнику коллекторного питания $E_к$ (рис. 131, *б*). Эти схемы дают более высокую стабильность частоты колебаний, чем рассмотренные ранее. Длительность импульсов и частота для схемы, показанной на рис. 131, *б*, приближенно определяются по формулам:

$$t_{и1} \approx 0{,}7\, R_{б1} C_2; \quad t_{и2} \approx 0{,}7\, R_{б2} C_1;$$

$$f = \frac{1}{t_{и1} + t_{и2}} \approx \frac{1{,}4}{R_{б1} C_2 + R_{б2} C_1}.$$

Мультивибраторы на туннельных диодах приобретают все большее значение в аппаратуре с высоким быстродействием, например в многоканальных системах связи с временным уплотнением и быстродействующих вычислительных устройствах. Для такой аппаратуры необходимы генераторы, вырабатывающие импульсы напряжения очень малой длительности с достаточно крутым фронтом и срезом. Этим условиям отвечают генераторы на туннельных диодах, позволяющие получить импульсы с частотой следования 50—100 МГц и длительностью фронта 10^{-9} с. Схемы на туннельных диодах сравнительно дешевы, напряжение для их питания составляет лишь доли вольта.

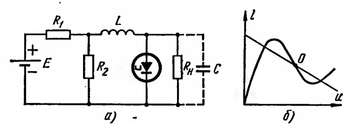


Рис. 132. Мультивибратор на туннельном диоде:
а — схема, *б* — характеристика диода

Примером быстродействующего импульсного генератора может служить мультивибратор на туннельном диоде (рис. 132, *а*). Нагрузочная характеристика диода должна пересекать его вольт-амперную характеристику на падающем участке (точка *0* на рис. 132, *б*). При этом сопротивление диода будет отрицательным и при правильном подборе элементов схема будет генерировать кратковременные импульсы напряжения. Для устойчивой генерации должно быть выполнено условие

$$L > R_i R_0 C,$$

где R_i — выходное сопротивление источника питания; R_0 — сопротивление диода в рабочей точке; C — суммарная паразитная емкость схемы и диода.

Период генерируемых колебаний

$$T \approx \frac{2L}{R_i - R_0}.$$

Мультивибратор в режиме синхронизации и деления частоты. Частота импульсов, генерируемых мультивибратором, непостоянна. При изменении напряжения источников питания, теплового режима и других случайных изменениях частота импульсов резко меняется. Поэтому часто осуществляют синхронизацию мультивибратора. *Синхронными* называются колебания, частоты которых равны или отличаются в целое число раз. Генераторы, создающие такие колебания и связанные между собой, также называются синхронными. Напряжение, синхронизирующее работу мультивибратора, пред-

ставляет собой синусоидальные колебания или остроконечные импульсы, частота которых очень стабильна. Это напряжение можно взять, например, от кварцевого генератора.

Рассмотрим работу мультивибратора в режиме синхронизации (рис. 133). Импульсы синхронизирующего напряжения имеют отрицательную полярность (плюс на корпус и минус на катод). По отношению к сеткам ламп импульсы будут положительными. Они одновременно воздействуют на сетки обеих ламп. Синхронизирующий

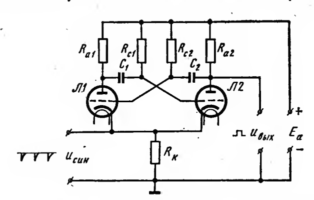


Рис. 133. Схема мультивибратора в режиме синхронизации

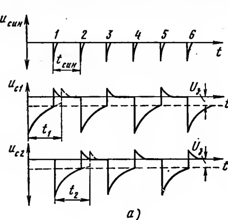
импульс *1* (рис. 134, *а*) поступает на сетки ламп в тот момент, когда отрицательное напряжение на сетке *Л1* превышает потенциал запирания $U_з$ и лампа *Л1* заперта. Импульс напряжения, положительный по отношению к сетке, отпирает лампу.

Если бы мультивибратор работал в режиме собственных колебаний, то отпирание лампы произошло бы позднее. На графике $t_{син}$ — период следования синхронизирующих импульсов, а t_1 и t_2 — длительность импульсов в автоколебательном режиме. Из графика видно, что $t_{син} < t_1$, т. е. параметры схемы подобраны так, что период следования импульсов меньше периода собственных колебаний мультивибратора.

При отпирании лампы *Л1* происходит лавинообразный процесс, в результате которого запирается лампа *Л2*. Следующий синхронизирующий импульс отпирает лампу *Л2* и запирает лампу *Л1*. Таким образом, в момент прихода каждого импульса происходит опрокидывание схемы. Импульсы *1*, *3*, *5* и т. д. отпирают лампу *Л1*, импульсы *2*, *4*, *6* и т. д. — лампу *Л2*. Выходное напряжение можно снимать с анода любой из ламп, например лампы *Л2*, как это показано на рис. 133. Частота колебаний, создаваемых мультивибратором, определяется только частотой синхронизирующих импульсов. Изменение режима питания и другие случайные причины почти не влияют на частоту.

Синхронизацию мультивибратора можно осуществить и в том случае, если частота синхронизирующих импульсов в несколько

раз больше частоты собственных колебаний мультивибратора. В этом случае опрокидывание схемы вызывают не все синхронирующие импульсы, а лишь некоторые из них. Например, как показано на рис. 134,*б*, лишь при воздействии третьего импульса напряжение на сетке лампы становится достаточным, для того чтобы отпереть лампу.



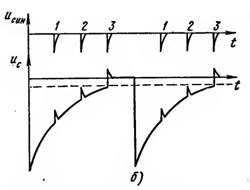


Рис. 134. Графики напряжений в схеме мультивибратора:
а — в режиме синхронизации, *б* — в режиме деления частоты

Частота колебаний мультивибратора оказывается в три раза меньше частоты синхронизирующих импульсов. Например, если к мультивибратору подведено напряжение с частотой 75 кГц, то с выхода его можно снять напряжение с частотой 25 кГц. Происходит *деление частоты*. Применяя последовательно несколько мультивибраторов, можно обеспечить деление частоты в большое число раз.

Применение мультивибраторов. Мультивибратор является простым и надежным в работе устройством. Однако мультивибраторы имеют и недостатки, ограничивающие их применение. Прежде всего мультивибратор не может создавать импульсы очень малой длительности. Кроме того, от мультивибратора нельзя получить импульсное напряжение с большой скважностью. Для схемы мультивибратора, показанной на рис. 129, например, максимальная скважность приближенно определяется по формуле

$$Q \approx 1 + \frac{\beta}{4},$$

где β — коэффициент усиления транзистора по току (в схеме с общим эмиттером). Для транзисторов массового применения $\beta = 30 \div 50$. Следовательно, наибольшая скважность редко бывает выше 10 и лишь за счет ухудшения формы импульсов может быть равна нескольким десяткам.

В схеме мультивибратора трудно обеспечить и хорошую форму импульсов.

Чтобы обеспечить большую крутизну переднего и заднего фронтов импульсов, нужно уменьшить время заряда и разряда конденсаторов в схеме, т. е. уменьшить постоянную времени цепи. Для этого нужно выбирать возможно меньшими емкости C_1 и C_2 и сопротивления в цепях коллекторов (анодов). Но при уменьшении сопротивлений напряжения на коллекторах (анодах) будут изменяться в небольших пределах, т. е. будет мала амплитуда выходного напряжения. Емкости же C_1 и C_2 должны быть, по крайней мере, в 5—10 раз больше паразитных емкостей схемы. Обычно C_1 и C_2 берут равными не меньше 100—200 пФ. Это ограничивает диапазон частот.

Чаще всего мультивибраторы используют для получения импульсов напряжения, близких по форме к прямоугольным. Импульсное напряжение такой формы содержит кроме основной частоты множество гармоник. Таким образом, мультивибратор, оправдывая свое название, действительно является генератором множества частот. Это используется, например, в приборах для измерения частоты. Широко применяют мультивибраторы и для деления частоты.

Различные схемы мультивибраторов используют в радиолокационных устройствах и аппаратуре телевидения и радиорелейной связи.

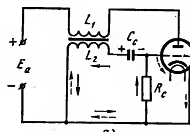
Блокинг-генераторы

Для генерирования импульсов с малой длительностью и большой скважностью применяют блокинг-генераторы. Импульсы могут иметь любую полярность и длительность от десятых долей микросекунды до нескольких сотен микросекунд, частоту повторения — от нескольких импульсов до сотен тысяч в секунду при скважности $Q \leqslant 1000$. Форма импульсов зависит от параметров схемы и может быть очень разнообразной: почти синусоидальной, прямоугольной и т. д.

Рассмотрим одну из распространенных схем блокинг-генератора (рис. 135,*а*) — схему лампового генератора с трансформаторной обратной связью. Так как трансформатор имеет сердечник из ферромагнитного материала, то обратная связь между цепями анода и сетки очень сильная. Для получения сеточного смещения в цепь сетки лампы включена цепочка R_c, C_c. Такая схема работает в режиме автоколебаний, но в отличие от генератора синусоидальных колебаний возбуждается не непрерывно, а периодически. Процесс самовозбуждения имеет лавинообразный характер.

При подключении схемы к источникам питания в анодной цепи лампы возникает ток. Он быстро нарастает и, протекая по первичной обмотке L_1 трансформатора, индуктирует во вторичной обмотке L_2 э. д. с. При положительной обратной связи направление э. д. с. таково, что на сетку лампы подается положительное по отношению к катоду напряжение. Это вызывает еще большее увеличение анодного тока, причем процесс лавинообразно нарастает.

Одиовременно пронсходнт быстрый заряд конденсатора C_c через промежуток сетка — катод лампы. Направленне тока заряда конденсатора показано на рисуике пунктирнымн лнннямн со стрелкамн. Левая (на схеме) пластнна кондеисатора, соедннениая с обмоткой L_2, заряжается положнтельно, а правая, соедннениая с сеткой лампы, отрнцательно.



Прн быстром увелнченни анодного тока лампы также быстро уменьшается напряженне на ее аноде вследствне падеиня напряжеиия на первнчиой обмотке трансформатора L_1. Эта стадня работы блокниг-генератора называется *стадией формирования фронта импульса.*

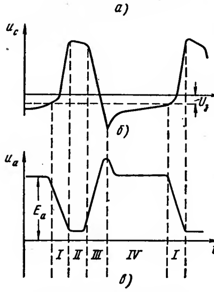


Рис. 135. Блокинг-генератор:
а — схема, *б, в* — напряжения на сетке и аноде

По мере прнблнження к режнму насыщеиня лампы скорость нарастання ее анодного тока уменьшается. Прн этом уменьшается н э. д. с., нндуктированная в обмотке L_2, а следовательно, уменьшается положнтельный потенцнал на сетке лампы, что еще больше замедляет нарастанне тока. В теченне небольшого промежутка временн анодный ток остается почтн нензменным и во вторичной обмотке трансформатора не нндуктнруется э. д. с. Этот короткнй промежуток временн соответствует рабочей стаднн — *формированию плоской части (вершины) импульса.*

Затем начннается разряд конденсатора C_c. Через промежуток сетка — катод лампы, обладающнй одностороннeй проводнмостью, ток разряда протекать ие может и конденсатор разряжается через резнстор R_c. Напряженне тока разряда показано на рисунке сплошнымн лнннямн со стрелкамн. Ток разряда создает на резнсторе R_c паденне напряжения. Мннус этого напряжения подан на сетку лампы, а плюс — на катод. Отрнцательный потеицнал на сетке лампы уменьшает анодный ток. Уменьшающнйся ток нндуктнрует во вторнчной обмотке трансформатора э. д. с., но уже протнвоположного направлення, что еще больше увеличвает отрнцательный потенцнал на сетке лампы.

В начальный момент ток разряда конденсатора велик, процесс нарастает лавинообразно и приводит к быстрому запиранию лампы. Эта стадия процесса соответствует *формированию среза импульса*. Конденсатор C_c разряжается через большое сопротивление R_c сравнительно медленно, и постепенно ток разряда уменьшается. Уменьшается и отрицательный потенциал на сетке лампы. Через некоторый промежуток времени лампа отпирается, и схема приходит в исходное состояние. Эта стадия процесса называется *стадией восстановления*. Далее начинается новое нарастание анодного тока и процесс повторяется.

На рис. 135, *б* и *в* показаны графики изменения напряжения на сетке и аноде лампы блокинг-генератора. (*I* — стадия формирования фронта импульса, *II* — формирования плоской части импульса, *III* — формирования среза и *IV* — восстановления.) Импульсы выходного напряжения можно снимать с анода лампы, причем амплитуда импульса будет почти равна напряжению источника анодного питания. Если же применить третью обмотку трансформатора, то на ней можно получить импульсы с амплитудой, большей, чем напряжение источника питания.

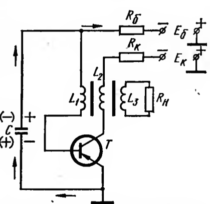


Рис. 136. Схема блокинг-генератора на транзисторе

Схема блокинг-генератора на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, изображена на рис. 136. На базу подается отрицательное смещение от источника напряжения $E_б$. Как и в схеме мультивибратора, смещение необходимо, чтобы случайное небольшое напряжение на базе не могло открыть транзистор и нарушить стабильность работы схемы.

Рассмотрим физические процессы в схеме. Начнем рассмотрение с момента, когда конденсатор C в процессе формирования импульса заряжен до максимального напряжения $U_c = U_{c.макс}$. Из схемы видно, что положительно заряженная пластина через обмотку L_1 трансформатора подключена к базе транзистора, а отрицательно заряженная — к эмиттеру. Транзистор заперт положительным напряжением на базе. Ток коллектора близок к нулю, напряжение на коллекторе равно $E_к$.

Заряженный конденсатор C начинает разряжаться по цепи: положительная (верхняя по схеме) пластина конденсатора, резистор $R_б$, источник питания цепи базы $E_б$, корпус, отрицательная пластина конденсатора. Направление тока разряда показано на рис. 136 сплошными линиями со стрелками.

Постоянная времени цепи разряда $\tau = CR_б$ велика, разрядный ток убывает медленно. Разряд продолжается до тех пор, пока на

кондеисаторе ие упадет до нуля напряжеиие U_c. Далее коиденсатор будет перезаряжаться током того же направлеиия до момеита, когда напряжеине нсточника цепн базы стаиет равиым $E_б$. Прн этом верхняя (по схеме) пластнна конденсатора окажется заряженной отрицательно, на базу траизнстора будет подаи мниус и транзнстор откроется.

Возннкает н растет коллекторный ток. Протекая по обмотке L_2 нмпульсного траисформатора, он иаводнт э. д. с. в обмотке L_1. При этом, еслн обмотка включена правнльно, на базу транзнстора подается мниус, увеличнвается ток базы $i_б$, а следовательио, и ток коллектора $i_к$. Прнрост тока $i_к$, протекающего в обмотке L_2, вызывает увелнчение э. д. с. в обмотке L_1, и ток базы $i_б$ еще больше возрастает. Этот процесс нарастает лавнннообразно и заканчнвается тогда, когда ток коллектора достигает иасыщеиия. Напряженне на коллекторе $U_к$ прн этом близко к иулю. Так формируется *фронт импульса*. Длнтельиость этого процесса в основном завнснт не от параметров схемы, а от свойств транзнстора.

Так как рост тока коллектора прекращается, то э. д. с. взаимоиндукции в обмотке L_1 резко падает. Прн этом убывает ток базы $i_б$, а это вызывает, во-первых, появлеине э. д. с. самонндукцнн в обмотке L_1, а во-вторых, э. д. с. взанмоиндукцни в обмотке L_2. Э. д. с. самонндукцнн в обмотке L_1 имеет тот же знак, что н э. д. с. взанмоиндукцнн, наводнмая в ией ростом коллекториого тока (мииус на базу, плюс на эмнттер). Под действнем этой э. д. с. пронсходнт заряд коиденсатора C. По мере его заряда умеиьшаются отрнцательиое иапряжеине на базе и ток базы, транзнстор выходнт нз режнма насыщення. Длнтельность этого процесса определяется не только времеием заряда кондеисатора, но н свойствамн транзнстора (на рассасываиие объемиого заряда вблизи коллектора требуется иекоторое время). Так формнруется *вершина импульса*.

Прн выходе транзнстора нз режнма насыщеиия начннается обратиый лавнннообразиый процесс. Умеиьшеиие тока коллектора вызывает появлеине э. д. с. взанмоиндукции в обмотке L_1. Теперь направлеиие ее таково, что на базу подается плюс, ток базы умеиьшается, что вызывает появлеиие э. д. с. взанмонидукции в обмотке L_2, еще более умеиьшающую ток коллектора. Процесс пронсходит быстро, н транзнстор запнрается. Так формнруется *спад* (*срез*) *импульса*. Схема возвращается в нсходное состояние.

На рис. 137 прнведены графики напряжеиия на коллекторе $u_к$, тока коллектора $i_к$ и иапряжения на базе $u_б$ в разлнчные моменты времени (*I* — формироваиие фронта нмпульса, *II* — формироваиие вершнны, *III* — спад импульса). Импульсы выходного напряження обычно сиимают с отдельиой обмоткн трансформатора (обмотка L_3 на схеме, показанной на рнс. 136).

Блокнng-генератор на транзнсторе может вырабатывать нмпульсы большой длнтельиости (десяткн н даже сотни мнкросекунд). Транзнстор может быть включеи и по схеме с общей базой, обеспечнвающей лучшую температурную стабнльность. Для работы блокнng-геиератора в ждущем режиме на сетку лампы нлн базу тран-

зистора подают запирающее напряжение. Пусковой импульс отпирает лампу или транзистор и блокинг-генератор начинает работать.

При работе в режиме синхронизации на сетку лампы или базу транзистора подают синхронизирующие импульсы, частота которых должна быть больше частоты колебаний блокинг-генератора. Так же как и мультивибратор, блокинг-генератор может применяться для деления частоты.

Схема блокинг-генератора проста и надежна в работе. При большой скважности импульсов можно получить большую мощность импульса даже при применении сравнительно маломощной лампы. Выходные импульсы имеют крутой фронт и срез, что является большим достоинством схемы. Все это определяет широкое применение блокинг-генераторов в импульсной технике.

Большое значение для работы блокинг-генератора имеет конструкция трансформатора. Этот трансформатор работает в импульсном режиме и имеет следующие особенности. Резкое изменение тока в обмотках вызывает резкие изменения магнитного потока в сердечнике. При этом увеличиваются потери на гистерезис и вихревые токи. Поэтому сердечник изготовляют из специальных материалов с большой начальной проницаемостью и малыми потерями, например из пермаллоя или стали специальных марок. Сердечник собирают из очень тонких пластин или выполняют в виде кольца из стальной ленты.

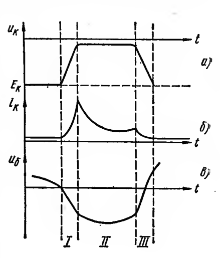


Рис. 137. Графики работы блокинг-генератора на транзисторе:
а — напряжение на коллекторе, *б* — ток коллектора, *в* — напряжение на базе

Контрольные вопросы

1. Как происходит процесс самовозбуждения в схеме автогенератора?
2. Какие схемы автогенераторов называются трехточечными? Как в этих схемах осуществляется обратная связь?
3. В чем состоит принципиальное отличие генератора с посторонним возбуждением от автогенератора?
4. Приведите пример схемы генератора пилообразного напряжения и объясните ее работу.
5. Какие особенности имеют генераторы на *RC*?
6. Какими параметрами характеризуется прямоугольный импульс?
7. Как осуществляется работа мультивибратора в автоколебательном режиме?
8. В чем состоит принцип синхронизации частоты и как осуществляется синхронизация мультивибратора?
9. Как возникают импульсные колебания в схеме блокинг-генератора?

Глава IX

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ

Реле — это устройство, реагирующее на изменение какой-либо величины и в соответствии с этим осуществляющее переключение в электрических цепях. При помощи реле производится включение аппаратуры, замыкание, размыкание и переключение электрических цепей, изменение режима работы различных установок и множество других операций. В зависимости от физической величины, на изменение которой реагирует реле, различают электрические, тепловые, оптические (световые), акустические (звуковые), механические и другие типы реле. В радиотехнической аппаратуре наиболее широко применяют электрические реле.

По принципу действия электрические реле делят на две группы — электромеханические (контактные) и электронные (бесконтактные). К первой группе относят реле с механическими движущимися контактами, например электромагнитные. Вторую группу составляют бесконтактные переключающие устройства, использующие свойства электромагнитных и ионных приборов или ферромагнитных материалов. В некоторых схемах встречается сочетание электронных приборов и электромеханических реле. Примером может служить электромагнитное реле, включенное в цепь анода электронной лампы. Такие схемы относят к первой группе, так как быстродействие их ограничено свойствами механических реле. Электронный же элемент здесь по существу играет роль усилителя.

§ 44. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ

Электронные реле имеют много достоинств. Они отличаются высокой чувствительностью, безынерционностью, быстродействием, надежны в работе, так как не имеют регулируемых и быстро изнашивающихся механических частей. Большой срок службы, простота обслуживания, малые габариты и масса, низкая стоимость электронных реле являются их преимуществами перед электромеханическими устройствами.

Как и в реле любого типа, в электронных реле существует управляющая (входная) электрическая цепь и управляемая (выходная). При плавном изменении входной величины, например входного напряжения, выходная величина (ток или напряжение) изменяется резко, скачкообразно.

Вольт-амперная характеристика релейной схемы имеет своеобразную форму. Рассмотрим это на примере простейшего электронного реле с неоновой лампой (рис. 138, *а*). Пока нет входного пускового сигнала, неоновая лампа не горит, ток через нее ничтожно мал, ее внутреннее сопротивление очень велико, велико и выходное напряжение. Если же на входе схемы появляется сигнал, который больше потенциала зажигания лампы, то в лампе возникает лавинообраз-

ный процесс ионизации, она зажигается, ток скачком увеличивается, а выходное напряжение падает. При дальнейшем увеличении входного напряжения ток почти не меняется.

При уменьшении входного напряжения ток медленно уменьшается, но в момент, когда входное напряжение становится меньше потенциала погасания, лампа гаснет, ток скачком падает, а выходное напряжение возрастает до первоначальной величины. На рис. 138, *б* показана вольт-амперная характеристика схемы. Сплошная линия

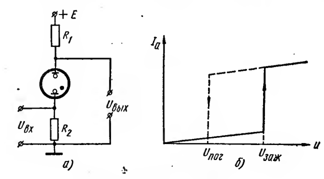


Рис. 138. Электронное реле:
а — схема, *б* — вольт-амперная характеристика

соответствует процессу зажигания, пунктирная — процессу погасания.

Схема с неоновой лампой проста, но работа ее нестабильна, в ней трудно получить прямоугольный импульс выходного напряжения и достаточно большую выходную мощность. Поэтому на практике в качестве электронных реле применяют другие схемы, например мультивибраторы в ждущем режиме и триггеры. В некоторых схемах возникает необходимость получить заданную выдержку времени. Это осуществляется при помощи электронных реле времени.

Мультивибратор в ждущем режиме

Мультивибратор, работающий в ждущем режиме, имеет одно состояние устойчивого равновесия, в котором находится до прихода внешнего запускающего импульса. При этом выходное напряжение мультивибратора близко к нулю. Внешний импульс переводит схему в положение неустойчивого равновесия на некоторое время, зависящее от ее параметров. Затем схема автоматически скачком возвращается в устойчивое состояние. В ждущем режиме могут работать мультивибраторы на транзисторах и на электронных лампах.

В § 43 была рассмотрена схема мультивибратора на транзисторах, работающего в режиме автоколебаний (см. рис. 129). Для получения ждущего режима нужно запереть один из транзисторов и заменить конденсатор C_2 резистором R (рис. 139,*а*). Рассмотрим физические процессы в полученной схеме. В исходном

состоянии транзистор $T1$ заперт, так как на его базу подано положительное напряжение от источника $E_б$. В коллекторной цепи транзистора $T1$ нет тока, поэтому напряжение на коллекторе почти равно напряжению источника $E_к$. От этого же источника заряжен конденсатор C, причем напряжение на его зажимах почти равно $E_к$. Транзистор $T2$ открыт, в его коллекторной цепи протекает ток. Это состояние является устойчивым, т. е. схема может находиться в нем сколь угодно долго, до прихода запускающего импульса.

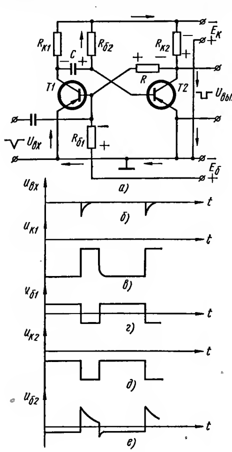


Рис. 139. Ждущий мультивибратор на транзисторах:
а — схема, б — входные импульсы, в, д — напряжения на коллекторах, г, е — напряжения на базах

Отрицательный запускающий импульс, поданный на вход схемы, отпирает транзистор $T1$, и в его коллекторной цепи появляется ток. На резисторе $R_{к1}$ возникает падение напряжения, поэтому напряжение на коллекторе $T1$ уменьшается. Изменение напряжения через конденсатор C передается на базу транзистора $T2$. Отрицательное напряжение на базе этого транзистора уменьшается, уменьшается и его коллекторный ток. Падение напряжения на резисторе $R_{к2}$ также уменьшается, а на резисторах R и $R_{б1}$, включенных последовательно с $R_{к2}$, соответственно увеличивается. Как видно из схемы, отрицательное напряжение на базе $T1$ еще больше возрастает.

Процесс очень быстро, лавинообразно нарастает и заканчивается, когда транзистор $T2$ оказывается запертым, а через транзистор $T1$ протекает максимальный коллекторный ток. При этом напряжение на коллекторе $T2$ почти равно напряжению источника $E_к$, а напряжение на коллекторе $T1$ минимальное. В этом состоянии неустойчивого равновесия схема находится до тех пор, пока не разрядится конденсатор C. Его разряд происходит через транзистор $T1$ и резистор $R_{б2}$. Направление тока разряда показано на рис. 139 стрелками.

Разрядный ток создает падение напряжения на резисторе $R_{б2}$, и в некоторый момент напряжение на базе транзистора *Т2* становится равным нулю. Транзистор *Т2* отпирается, начинается лавинообразный процесс обратного направления, и схема быстро, скачком, возвращается в исходное состояние. На рис. 139, *б—е* приведены графики напряжений в схеме (входные импульсы и напряжения на коллекторах и базах обоих транзисторов).

Импульс входного напряжения можно снять с коллектора одного из транзисторов, например с коллектора *Т2*, так показано на рис. 139, *а*. Длительность выходного импульса определяется време-

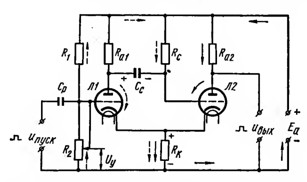


Рис. 140. Схема ждущего мультивибратора на электронных лампах

нем разряда конденсатора *С* и приближенно может быть найдена по формуле

$$t_и \approx 0{,}7 \cdot CR_{б2}.$$

Так как в цепи транзистора *Т2* емкость отсутствует и в исходном состоянии он открыт, изменение напряжений в схеме происходит практически мгновенно и выходные импульсы имеют почти прямоугольную форму. Это определяет применение ждущих мультивибраторов. При помощи таких схем получают широкие прямоугольные импульсы из узких импульсов произвольной формы. Кроме того, ждущие мультивибраторы используют для задержки импульсов на определенное время, образования ждущей развертки в осциллографах и др.

На рис. 140 показана схема ждущего мультивибратора на электронных лампах. Это схема с катодной связью. Для ждущих мультивибраторов она применяется чаще, чем схема с анодной связью. В схеме с катодной связью ослаблена нежелательная связь между нагрузкой (сопротивление R_{a2}) и источником пусковых импульсов. Кроме того, осуществляется удобная регулировка длительности выходных импульсов.

При отсутствии пускового импульса лампа *Л1* заперта, а лампа *Л2* открыта. Так как через лампу *Л1* не протекает ток, то на сопротивлении R_{a1} нет падения напряжения и напряжение на аноде *Л1* равно напряжению источника анодного питания E_a. Анодный ток

открытой лампы $Л2$ протекает по цепи: положительный полюс анодного источника $E_а$, сопротивление $R_{а2}$, промежуток анод — катод лампы $Л2$, сопротивление $R_к$, минус источника анодного напряжения. Направление тока показано на рисунке сплошными линиями со стрелками. На резисторе $R_к$ создается падение напряжения. Минус этого напряжения через резистор R_2 подан на сетку $Л1$ и поддерживает ее в запертом состоянии. Конденсатор $C_с$ заряжен примерно до величины $E_а$.

Внешний импульс положительной полярности подается на сетку лампы $Л1$ и отпирает ее. Через лампу $Л1$ начинает протекать ток. Возникает падение напряжения на резисторе $R_{а1}$, а напряжение на аноде $Л1$ уменьшается. Конденсатор $C_с$ начинает разряжаться. Цепь разряда конденсатора: левая (положительная) пластина, промежуток анод — катод лампы $Л1$, резисторы $R_к$, R_1, R_2, и $R_с$, правая (отрицательная) пластина конденсатора. Направление тока разряда показано на рисунке пунктирными линиями со стрелками.

Рис. 141. Графики напряжений в схеме ждущего мультивибратора на электронных лампах:

а — пусковой импульс, *б*, *в* — напряжение на аноде первой лампы, *в* — напряжение на аноде второй лампы

На резисторе $R_с$ создается падение напряжения, минус которого подан на сетку $Л2$. Как и во всех других схемах, процесс быстро, скачком, нарастает и приводит к запиранию лампы $Л2$, т. е. к опрокидыванию схемы. В этом, новом состоянии, когда лампа $Л1$ открыта, а лампа $Л2$ заперта, в схеме происходят медленные изменения и такое состояние является неустойчивым.

По мере разряда конденсатора $C_с$ ток разряда уменьшается, напряжение на резисторе $R_с$ уменьшается и постепенно достигает значения, при котором лампа $Л2$ отпирается. Анодный ток лампы $Л2$ создает падение напряжения на резисторе $R_к$ и запирает лампу $Л1$. Конденсатор $C_с$ заряжается по цепи: плюс $E_а$, резистор $R_{а1}$, конденсатор $C_с$, промежуток сетка — катод лампы $Л2$, резистор $R_к$, минус $E_а$. По окончании заряда конденсатора восстанавливается устойчивое равновесие схемы.

На рис. 141 показаны графики напряжений в схеме ждущего мультивибратора. Из графиков видно, что кратковременный пусковой импульс напряжения на входе вызывает появление более длительного отрицательного импульса напряжения на аноде $Л1$ и такого же положительного импульса на аноде $Л2$. В зависимости от того, какая полярность импульсов требуется на выходе, выходное напряжение можно снимать с анода первой или второй лампы. Длитель-

ность выходного импульса в основном определяется величинами R_c и C_c. Подбирая их, можно получить импульсы длительностью в десятки или сотни микросекунд. Величины сопротивлений R_{a1}, R_{a2} и $R_к$ в меньшей степени влияют на длительность импульса. Напряжение источника питания E_a и потенциал запирания лампы для получения импульсов определенной длительности должны быть неизменны.

Резисторы R_1 и R_2 образуют делитель напряжения. С резистора R_2 на сетку лампы *Л2* подается небольшое положительное напряжение, называемое управляющим напряжением U_y. Изменяя величину управляющего напряжения, можно регулировать длительность выходных импульсов, причем длительность импульса находится в прямой пропорциональной зависимости от величины управляющего напряжения. Это удобно для регулировки.

Триггер

Наиболее широкое распространение в качестве электронных реле получили триггеры. Схема триггера может быть выполнена на транзисторах, электронных лампах, тиратронах. В последние годы получают распространение триггеры на туннельных диодах. Для запуска триггера достаточны сигналы очень малой мощности, порядка миллионных долей ватта, на выходе же триггера можно получить сигнал, во много раз больший. Таким образом, работа триггера аналогична работе реле, где замыкание цепи слабого тока может вызвать переключение мощного устройства.

Рассмотрим схему триггера на транзисторах (рис. 142, *а*). Схема имеет два устойчивых состояния, запускающий импульс переводит ее из одного состояния в другое. Напряжение смещения на базы транзисторов подается от источника $E_б$. Запускающие импульсы положительной полярности поступают поочередно на оба входа схемы через разделительные диоды *Д1* и *Д2*.

В исходном состоянии один из транзисторов заперт. Предположим, что заперт транзистор *Т2*, а транзистор *Т1* открыт и в его коллекторной цепи протекает ток. Напряжение на коллекторе *Т2* почти равно напряжению источника питания $E_к$, так как падения напряжения на резисторе $R_{к2}$ нет. Отрицательное напряжение на коллекторе транзистора *Т1* невелико, так как на резисторе $R_{к1}$ есть падение напряжения. В этом устойчивом состоянии схема находится до прихода запускающего импульса. Положительный импульс, поданный на базу транзистора *Т1*, запирает его. Ток в цепи коллектора прекращается, падения напряжения на резисторе $R_{к1}$ нет и отрицательное напряжение на коллекторе *Т1* резко возрастает.

Последовательно с $R_{к1}$ включены резисторы R_1 и $R_{б2}$. Уменьшение напряжения на $R_{к1}$ вызывает соответственный рост напряжения на резисторах R_1 и $R_{б2}$. Как видно из схемы, на базе транзистора *Т2* увеличивается отрицательное напряжение и транзистор отпирается. В его коллекторной цепи появляется ток, на резисторе $R_{к2}$ возникает падение напряжения. На резисторах R_2 и $R_{б1}$, включен-

ных последовательно с $R_{к2}$, напряжение соответственно уменьшается. На базе транзистора *T1* уменьшается отрицательное смещение, падает его коллекторный ток. Процесс лавинообразно нарастает и заканчивается, когда транзистор *T1* заперт, а транзистор *T2* открыт

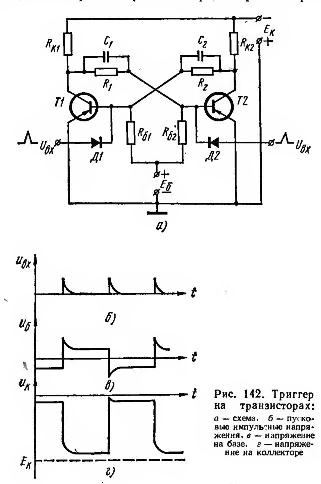


Рис. 142. Триггер на транзисторах:
а — схема, *б* — пусковые импульсные напряжения, *в* — напряжение на базе, *г* — напряжение на коллекторе

и его коллекторный ток достигает максимума. Это второе устойчивое состояние схемы продолжается до тех пор, пока на базу транзистора *T2* не будет подан положительный запирающий импульс. Он вернет схему в первоначальное устойчивое положение. Для ускорения переключения параллельно резисторам R_1 и R_2 включены конденсаторы C_1 и C_2.

На рис. 142, *б, в, г* показаны графики напряжений одного из транзисторов схемы. Напряжения на электродах второго транзистора изменяются по тем же законам, но в противоположной фазе. Пере-

ключение схемы можно осуществлять импульсами отрицательной полярности, подавая их поочередно на базу запертого транзистора. Возможен запуск триггера и импульсами чередующейся полярности. В этом случае их нужно подавать на базу одного из транзисторов.

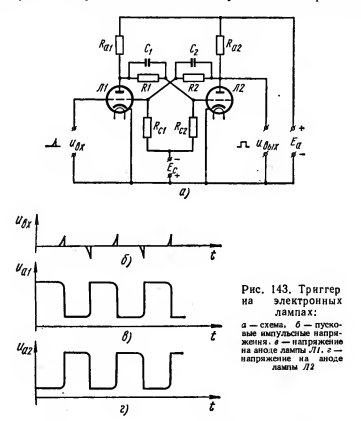


Рис. 143. Триггер на электронных лампах:

а — схема, *б* — пусковые импульсные напряжения, *в* — напряжение на аноде лампы *Л1*, *г* — напряжение на аноде лампы *Л2*

Можно исключить из схемы источник смещения базы $E_б$ и осуществить автоматическое смещение. Для этого в общую цепь обоих эмиттеров нужно включить резистор, шунтированный конденсатором. Схема с автоматическим смещением проще, но ее температурная стабильность хуже. Кроме того, за счет падения напряжения на сопротивлении смещения несколько уменьшается амплитуда выходного импульса.

Схема триггера на электронных лампах изображена на рис. 143. В этой схеме обычно применяется двойной триод. Параллельно источнику анодного напряжения E_a в схеме включены две цепочки: R_{a1}, R_1, R_{c2} и R_{a2}; R_2 и R_{c1}, образующие делители напряжения. С резисторов R_{c1} и R_{c2} на сетки ламп снимаются положительные напряжения. Кроме того, на сетки подается отрицательное напряжение смещения E_c от отдельного источника.

При включении схемы в анодных цепях обеих ламп протекают токи, на сетках ламп устанавливаются постоянные напряжения, но такое состояние схемы является неустойчнвым. Даже при полной симметрии схемы токи ламп не могут быть длительное время точно равны друг другу. По какой-либо причине, например вследствие неизбежных колебаний тока эмиссии, анодный ток одной нз ламп окажется больше, чем другой.

Предположим, что увеличился анодный ток лампы *Л2*. Прн этом возрастает падение напряжения на резисторе R_{a2}, а напряжение на аноде *Л2* уменьшится. Тогда уменьшится и напряжение на резисторах R_2 и R_{c1}, включенных последовательно с резистором R_{a2}. Теперь на сетку лампы *Л1* с резистора R_{c1} будет сниматься меньшее положительное напряжение и анодный ток этой лампы уменьшится. Уменьшится также падение напряжения на резнсторе R_{a1}. Напряжение на резисторах R_1 и R_{c2} при этом возрастет, с резистора R_{c2} будет сниматься большее положительное напряжение и анодный ток лампы *Л2* возрастет еще больше.

Процесс развивается лавинообразно н быстро приводит к полному запиранию лампы *Л1*. Анодный ток лампы *Л2* при этом достигает максимального значения. Такое состояние схемы является устойчивым. Схема может находиться в этом состоянии сколь угодно долго до тех пор, пока на сетку лампы *Л1* не поступит импульс положительного напряжения, достаточный для того, чтобы отпереть лампу. При этом в схеме возникает лавинообразный процесс обратного направления.

В цепи анода *Л1* появится ток, увеличится паденне напряжения на резисторе R_{a1}, а напряжение на резисторе R_{c2} уменьшится. На сетку лампы *Л2* будет сниматься меньшее положительное напряжение, ее анодный ток уменьшится. Уменьшится падение напряжения на резисторе R_{a2}, увеличится положительное напряжение, снимаемое с резистора R_{c1} на сетку лампы *Л1*, ее анодный ток возрастет еще больше. Этот процесс очень быстро, скачком, приведет к запиранию лампы *Л2*, а анодный ток лампы *Л1* достигнет максимума. Произойдет опрокидывание схемы. В этом новом состоянии устойчивого равновесия схема также может находиться сколь угодно долго, и, чтобы вызвать опрокидывание ее, нужно подать на сетку лампы *Л1* импульс отрицательной полярности.

Таким образом, можно управлять работой триггера, подавая на сетку одной из ламп импульсы чередующейся полярности.

На рис. 143, *б*, *в*, *г* показаны графики напряжений в схеме триггера. При каждом пусковом импульсе происходит опрокидывание схемы, одна из ламп отпирается, а другая запирается. В анодной цепи каждой из ламп возникают импульсы напряжения определенной длительности, имеющие почти прямоугольную форму.

Если пусковые импульсы имеют неизменную полярность, то их подают поочередно на сетку то одной то другой лампы. Чтобы уменьшить связь между схемой триггера и устройством, которое вырабатывает пусковые импульсы, их подают через разделительные диоды. Запускающее напряжение может иметь и другую форму, отличительную

от импульсной. Опрокидывание схемы будет происходить каждый раз, когда это напряжение достигнет величины, достаточной для отпирания лампы.

Ламповый триггер на триодах хорошо работает до частот в несколько сот килогерц. Во многих случаях частота импульсов запуска больше и рассмотренная схема не сможет срабатывать от каждого импульса. Чтобы уменьшить время переключения, параллельно ре-

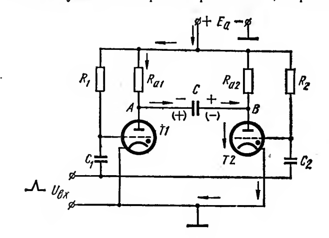


Рис. 144. Схема триггера на тиратронах

зисторам R_1 и R_2 включают конденсаторы C_1 и C_2 (50—100 пФ). Без этих конденсаторов междуэлектродная емкость заряжается через резисторы R_1 или R_2, на что требуется некоторое время. При коротком импульсе схема может не сработать. Увеличение быстроты действия триггера — очень важная задача. В некоторых устройствах быстрота переключений является решающей. Например, скорость вычисления некоторых математических машин зависит от быстроты действия триггера.

Триггеры на тиратронах (тиратронное реле) позволяют при малых входных импульсах сеточного напряжения получить большой выходной ток в анодной цепи. Особенно часто применяют экономичные и имеющие малые размеры тиратроны с холодным катодом, например МХТ-90.

На рис. 144 показана схема триггера на тиратронах, широко распространенная в устройствах автоматики. Работа схемы в основном происходит так же, как и в схемах триггеров на электронных лампах или транзисторах. В исходном положении один из тиратронов заперт, другой открыт. Предположим, заперт тиратрон *Т2*, а тиратрон *Т1* открыт. В цепи анода *Т1* протекает ток, на резисторе R_{a1} возникает падение напряжения и потенциал анода *Т1* (точка *А*) мал. В цепи анода тиратрона *Т2* тока нет, напряжение на аноде этого тиратрона (точка *В*) равно напряжению анод-

ного источника $E_а$. Между анодами тиратронов включен конденсатор C. Так как потенциал анода $T2$ выше, чем анода $T1$, то правая (по схеме) пластина конденсатора заряжена положительно по отношению к левой. Напряжение на конденсаторе C близко к напряжению анодного источника $E_а$

Положительный запускающий импульс на входе зажигает тиратрон $T2$. В цепи анода $T2$ возникает ток, на резисторе $R_{а2}$ появляется напряжение, потенциал анода $T2$ (точка B) резко уменьшается. Конденсатор C начинает разряжаться через тиратрон $T2$, источник питания $E_а$ и резистор $R_{а1}$. Направление тока разряда показано на

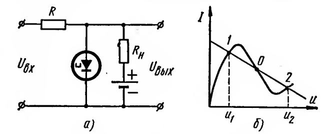


Рис. 145. Триггер на туннельном диоде:
а — схема, *б* — характеристика диода

рис. 144 стрелками. Потенциал анода $T1$, резко понижаясь, становится ниже потенциала зажигания тиратрона, и он гаснет.

Анодный ток $T1$ прекращается, напряжение на аноде становится почти равным $E_а$, а конденсатор C оказывается перезаряженным. Полярность его пластин в этот момент показана на рис. 144 в скобках. Это второе устойчивое состояние схемы, в котором она находится до прихода следующего запускающего импульса. Выходное напряжение можно снять с резистора $R_{а1}$ или $R_{а2}$.

Для быстродействующих устройств триггеры выполняют на туннельных диодах. Простейшая схема такого триггера изображена на рис. 145, *а*. Сопротивление нагрузки $R_н$ выбирают так, чтобы нагрузочная прямая пересекала характеристику диода в трех точках (рис. 145, *б*). Напряжениям u_1 и u_2 соответствуют два устойчивых состояния схемы. В исходном положении схема триггера находится в одном из них. Входные импульсы подаются на резистор R, сопротивление которого много больше сопротивления нагрузки.

Если амплитуда запускающего импульса достаточно велика, то рабочая точка 0 попадает на падающий участок характеристики диода. В схеме возникает лавинообразный процесс, в результате которого триггер переходит из одного состояния устойчивого равновесия в другое. Следующий запускающий импульс имеет противоположную полярность и возвращает схему в исходное положение.

Триггеры очень широко используют для включения или выключения различных электрических цепей, получения импульсов напряжения прямоугольной формы, счета частиц вещества или электрических сигналов и во многих других случаях.

Электронные реле времени

Реле времени служит для получения заданной выдержки времени при включении и выключении электрических цепей. В большинстве практических схем для этого используется заряд или разряд конденсатора через активное сопротивление. Подбирая величины R и C можно получить выдержку времени от миллисекунд до нескольких секунд.

Рассмотрим схему реле времени на электронной лампе (рис. 146). В положении *1* ключ K замыкает накоротко конденсатор C. На сетку лампы подается отрицательное напряжение $E_с$, запирающее лампу, анодный ток равен нулю, анодное реле P не

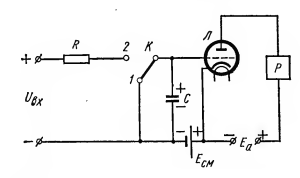


Рис. 146. Схема реле времени на электронной лампе

работает. Если ключ перевести в положение *2*, то конденсатор начнет заряжаться через резистор R от источника входного напряжения $U_{вх}$. Напряжение на конденсаторе $u_с$ будет постепенно нарастать. Из схемы видно, что это напряжение включено навстречу напряжению смещения $E_с$. Следовательно, напряжение на сетке лампы в любой момент времени равно разности $u_с$ и $E_{см}$. Когда $u_с$ становится больше $E_с$, напряжение на сетке будет положительным и лампа откроется. Заряд конденсатора продолжается, положительное напряжение на сетке увеличивается, анодный ток растет. Когда ток достигает определенной величины, анодное реле P срабатывает.

Время, которое проходит от момента замыкания ключа до момента срабатывания реле, называется *временем выдержки*. Оно зависит от параметров цепи RC и режима работы схемы (напряжение смещения, ток срабатывания реле и т. п.). При обратном переключении ключа конденсатор замыкается накоротко, лампа запирается отрицательным напряжением на сетке и анодное реле отпускает (выключается).

Подобную схему можно составить для замедления отпускания реле. Если же в анодную цепь лампы включить последовательно несколько электромагнитных реле с различным током срабатывания, то получится *программное реле времени*.

На рис. 147 показана схема реле времени с неоновой лампой. В исходном положении ключ K разомкнут, лампа не горит, ее сопротивление велико. При замыкании ключа конденсатор C начинает заряжаться от источника питания через резистор R. (Направление тока заряда показано на рисунке сплошными линиями со стрелками.) Чем больше сопротивление R и емкость C, тем медленнее заряжается конденсатор и, следовательно, больше выдержка времени.

Когда напряжение на конденсаторе достигает потенциала зажигания лампы, в ней появляется ток, протекающий и в обмотке реле P. Так как внутреннее сопротивление лампы после зажигания ста-

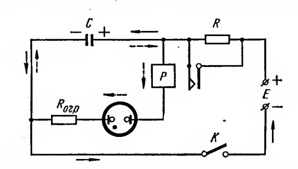


Рис. 147. Схема реле времени с неоновой лампой

новится очень малым, то конденсатор C начинает разряжаться через лампу. Направление тока разряда показано на рисунке пунктирными линиями со стрелками. Регулятор $R_{огр}$ ограничивает величину тока в лампе.

Ток разряда протекает также через обмотку электромагнитного реле P, и оно срабатывает. Его рабочие контакты (на схеме не показаны) включают заданную электрическую цепь. Дополнительные же контакты замыкают накоротко резистор R. Поэтому разряд конденсатора происходит очень быстро и схема возвращается в исходное состояние.

Рассмотренная схема проста и удобна в эксплуатации, но имеет недостатки. Электромагнитное реле должно быть достаточно чувствительным, а конденсатор должен иметь значительную емкость и, значит, большие размеры. Кроме того, при колебаниях напряжения источников питания будет меняться момент зажигания лампы, а следовательно, и выдержка времени.

От этих недостатков свободны схемы реле времени на тиратронах. На рис. 148 изображена одна из таких схем. В исходном положении ключ K разомкнут и тиратрон не горит. При замыкании ключа между управляющим электродом и катодом тиратрона появляется небольшой ток тлеющего разряда. Сопротивление R_1 ограничивает величину тока.

Одновременно начинает заряжаться конденсатор C через резистор R. Напряжение на конденсаторе постепенно растет и, наконец, достигает напряження зажигания тиратрона. В анодной цепи тиратрона возникает ток. Как видно из схемы, он протекает через обмотку реле P. Так как сопротивление тиратрона после зажигания становится очень небольшим, то конденсатор начинает разряжаться через резнстор R_2, тнратрон н обмотку реле. Реле срабатывает. Выдержка времени в этой схеме зависит от величин C и R. Подбирая эти величины, можно регулировать длительность выдержки в больших пределах.

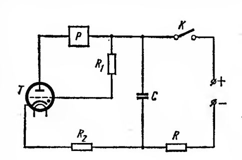


Рис. 148. Схема реле времени на тиратроне

§ 45. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ

Фотоэлектронные реле (фотореле) представляют собой сочетание электронного реле с фотоэлементом или другим фоточувствительным прибором (фотодиодом, фототранзистором). Фотореле широко применяют в самых различных отраслях народного хозяйства. При помощи фотореле осуществляют дистанционное управление аппаратурой, автоматическое включение осветительных устройств, контроль за количеством и качеством разнообразной продукции, охрану входов в опасные для персонала зоны промышленного производства, контроль запыленности и задымленности помещений, обслуживание турникетов метрополитена и многое другое.

По прннципу действия фотореле делят на две группы. В фотореле первой группы световой поток излучателя остается неизменным, а изменяется пропускная способность среды. Прнмером может служить фотореле, осуществляющее счет промышленных изделий. Свет от лампы накаливания падает на фотоэлемент, а каждое изделие, двигаясь по конвейеру, прерывает световой поток. Фотореле второй группы, например включающие освещенне, реагируют на изменение светового потока.

Схема включения фоточувствительного элемента может быть составлена так, чтобы реле срабатывало илн при освещенин, или при затемненин. Фотореле, срабатывающие при освещении, называются реле прямого действия, срабатывающие прн затемненни — реле обратного действия.

Простейшее *фотореле прямого действия* может быть выполнено по схеме, показанной на рис. 149. Пока на фотоэлемент не падает свет, фототок равен нулю. Лампа заперта отрнцательным напряжением E_c. Тока в ее анодной цепи нет. При воздействии светового потока на фотоэлемент в его анодной цепи появляется фототок, протекающий по цепи: плюс E_a, фотоэлемент, резистор $R_{огр}$,

минус $E_а$. На резисторе R возникает падение напряжения, плюс которого подается на сетку лампы. Лампа отпирается, в ее анодной цепи появляется ток, и реле P срабатывает. Когда прекращается световой поток, реле размыкается.

В схеме фотореле обратного действия (рис. 150) электромагнитное реле замкнуто при отсутствии светового потока. Фототока нет, внутреннее сопротивление фотоэлемента $Ф$ очень велико, и сетка лампы $Л$ отключена от источника смещения $E_с$. Через резистор $R_с$ на сетку подается небольшое положительное напряже-

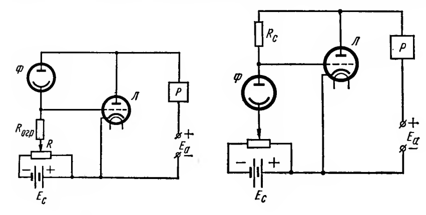


Рис. 149. Схема фотореле прямого действия

Рис. 150. Схема фотореле обратного действия

ние от источника $E_а$. Через лампу протекает ток, и реле P замкнуто. При появлении светового потока через фотоэлемент протекает ток и источник отрицательного смещения $E_с$ оказывается подключенным к сетке лампы. Лампа запирается, анодный ток прекращается и реле отпускает контакты.

В обеих рассмотренных схемах лампа используется как усилительный элемент, так как ток фотоэлемента слишком мал для срабатывания реле. Недостаток схем такого типа — влияние колебаний напряжения источников питания. От этого недостатка свободна схема дифференциального реле (рис. 151). Если оба фотоэлемента *Ф1* и *Ф2* освещены одинаково, их анодные токи равны и на резисторах $R_{с1}$ и $R_{с2}$ возникают одинаковые небольшие напряжения. Как видно из схемы, положительный полюс каждого их этих напряжений подан на сетки ламп. Анодные токи ламп равны, на резисторах $R_{а1}$ и $R_{а2}$ создаются одинаковые напряжения, и потенциалы анодов обеих ламп (точки *А* и *В*) также одинаковы. Тока в обмотке реле P нет, реле разомкнуто. Реле срабатывает только в случае, если один из элементов освещен более интенсивно, чем другой.

Предположим, увеличился световой поток фотоэлемента *Ф1*. Возрос фототок этого элемента, падение напряжения на резисторе $R_{с1}$ также увеличилось. Возрос положительный потенциал на сетке лам-

пы $Л1$ и ее анодный ток. Увеличилось падение напряжения на резисторе $R_{а1}$, и потенциал точки A уменьшился. Разность потенциалов между точками A и B вызовет появление тока в обмотке реле, и оно срабатывает.

На рис. 152 изображена схема фотореле переменного тока. Питание переменным током упрощает схему, так как не нужны выпрямители или батареи. Но реле переменного тока малочувствительно и более инерционно, чем реле постоянного тока. Реле работает следующим образом. Как видно из схемы, накал лампы $Л$, анодная цепь и цепь сетки питаются от отдельных обмоток трансформатора. Обмотки включены таким образом, что при положи-

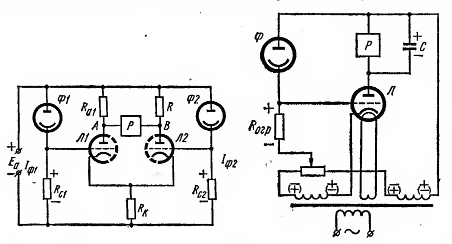


Рис. 151. Схема дифференциального фотореле

Рис. 152. Схема фотореле переменного тока

тельном полупериоде напряжения на аноде лампы на ее сетке возникает отрицательное напряжение, запирающее лампу. Таким образом, если фотоэлемент $Ф$ не освещен, тока в цепи анода лампы нет и реле P не работает.

Если же на фотоэлемент попадает поток света, то в течение положительного полупериода напряжения на его аноде протекает фототок, который создает на резисторе $R_с$ падение напряжения. Положительный полюс этого напряжения подается на сетку лампы и компенсирует отрицательное напряжение, возникающее в сеточной обмотке трансформатора. Лампа отпирается, и так как именно в этот полупериод на ее аноде напряжение положительно, то в ее анодной цепи возникает ток и реле срабатывает. Одновременно заряжается конденсатор C, который поддерживает ток в обмотке реле в течение отрицательного полупериода, когда лампа закрыта. Поэтому реле оказывается замкнутым все время, пока на фотоэлемент действует световой поток.

Чувствительность фотореле с большой выходной мощностью можно получить в случае сочетания фотоэлемента с тиратроном. С х е м а ф о т о т и р а т р о н н о г о р е л е показана на рис. 153. Работа этой схемы основана на изменении фазовых сдвигов между переменными напряжениями на аноде и сетке тиратрона T.

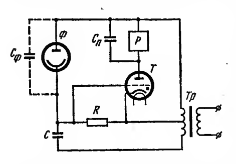


Рис. 153. Схема фототиратронного реле

Сдвиг зависит от величины емкости C, индуктивности вторичной обмотки питающего трансформатора Tp и внутреннего сопротивления фотоэлемента $Ф$. Имеет значение также и эквивалентная емкость фотоэлемента $C_ф$. (Фотоэлемент, трансформатор и конденсатор образуют схему мостового фазорегулятора.) Все эти элементы подобраны так, что при неосвещенном фотоэлементе напряжения на сетке и аноде тиратрона сдвинуты по фазе на 180° и тиратрон не горит.

Когда же на фотоэлемент попадает свет, его внутреннее сопротивление резко уменьшается, сдвиг фаз между напряжениями анода и сетки также уменьшается и тиратрон зажигается. В анодной цепи тиратрона возникает ток, и электромагнитное реле P замыкается. Конденсатор $C_п$ поддерживает ток в обмотке реле в течение отрицательных полупериодов напряжения, и реле замкнуто все время, пока на фотоэлемент падает свет.

Контрольные вопросы

1. Какое назначение имеют электронные реле? Каковы преимущества электронных реле перед электромеханическими?
2. Приведите пример схемы электронного реле и объясните ее работу.
3. Как происходит работа мультивибратора в ждущем режиме?
4. Приведите пример схемы триггера и объясните ее работу.
5. Какое назначение имеют фотоэлектронные реле?
6. Чем отличаются фотореле прямого действия от фотореле обратного действия
7. Какие достоинства имеет дифференциальное фотореле?

Глава X
РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Радиопередатчик предиазиачеи для геиерации и излучеиия колебаиий высокой частоты. На эти колебаиия воздействуют сигналы, которые иужно передавать (речь, музыка, телеграфные или телевизиоиные сигналы и т. п.).

В блок-схеме простейшего радиопередатчика (рис. 154) содержатся следующие элемеиты:

возбудитель, или задающий геиератор, который служит для получеиия токов высокой частоты;

усилитель мощиости, предиазначеный для получеиия задаииой мощиости высокой частоты;

аитеииа, предиазиачеииая для излучеиия радиоволн;

управляющее устройство, при помощи которого осуществляется воздействие сигнала иа колебаиия высокой частоты. В простейшем случае это может быть телеграфный ключ. Когда ключ нажат, аитеииа излучает радиоволиы, при отжатом ключе излучеиие прекращается. При передаче речи, музыки или сигиалов изображеиия управляющим устройством служит модулятор.

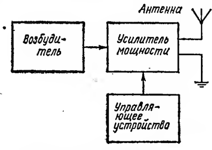


Рис. 154 Блок-схема радиопередатчика

§ 46. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Радиопередающие устройства примеияют в радиосвязи, радиовещании, телевидеиии, радиолокации, во миогих областях иаучиых исследований и иародиого хозяйства (промышлеииость, строительство и др.). Поэтому существует большое разиообразие типов и коиструкции радиопередатчиков. Работа каждого из иих характеризуется определеииыми качествеииыми показателями. Рассмотрим осиовиые показатели.

Мощность колебаний в аитение. Чем больше мощиость, излучаемая аитеииой передатчика, тем больше его дальиость действия и иадежиость радиосвязи, ио тем больше и помехи другим радиостаициям. Поэтому каждый передатчик в зависимости от иазиачения должеи иметь вполне определениую мощиость. Передатчики радиовещательных стаиций, работающие иа средиих волиах, имеют мощиость сотии киловатт, а коротковолиовые и УКВ передатчики радиосвязи — десятки и даже едииицы ватт.

Диапазон волн (частот) также определяется назначением передатчика. Различные передатчики работают на всех диапазонах волн, включая и миллиметровые волны.

Стабильность частоты. Каждому радиопередатчику отводится для работы определенная частота (длина волны), на которую настраивается приемник корреспондента. Если в процессе работы частота колебаний, излучаемых передатчиком, меняется, то прием его ухудшается, а иногда становится совсем невозможным.

В современной технике передача сигналов происходит с большой скоростью. Радиоаппаратура должна обеспечивать беспоисковую бесподстроечную связь. Это значит, что при вхождении в связь нельзя настраивать приемник и «искать» корреспондента. Связь должна быть обеспечена с первого же сигнала, а в процессе работы недопустима подстройка приемника, так как перерыв в связи даже на несколько секунд создает потерю большого количества сигналов.

Все эти требования можно выполнить лишь при условии высокого постоянства (стабильности) частоты передатчика. Кроме того, если передатчик отклоняется от заданной частоты, то он создает помехи другим линиям радиосвязи. По существующим нормам допустимые отклонения частоты передатчика от номинальной не превышают сотых долей процента.

Фильтрация гармоник. Кроме основной частоты антенна передатчика излучает в окружающее пространство другие частоты. Особенно заметно излучение гармоник, т .е. частот, кратных основной. Это может создать помехи близко расположенным приемникам. Например, если передатчик работает на волне 20 м (15 МГц) и одновременно излучает вторую гармонику, то он может воздействовать на приемник, настроенный на волну 10 м (30 МГц).

Можно уменьшить излучение гармоник, применяя контуры, настроенные на основную частоту. Чем больше контуров имеет передатчик, тем лучше обеспечивается подавление (фильтрация) гармоник. Введены жесткие нормы и для допустимой мощности гармоник. На волнах короче 100 м, например, мощность гармоник должна быть меньше 1% мощности основной частоты.

Допустимые искажения. Передатчик не должен вносить заметных искажений при передаче сигнала. Допустимые нелинейные и частотные искажения определяются назначением передатчика. Например, для радиовещательных передатчиков коэффициент нелинейных искажений не должен быть больше 2—3%, а для передатчиков передвижных радиотелефонных станций может достигать 8—10%.

Потребляемая мощность. Эта величина особенно важна для мощных радиопередатчиков. Чем меньше потребляемая мощность при заданной мощности в антенне, тем выше к. п. д. передатчика.

§ 47. ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР

Для получения синусоидальных колебаний высокой частоты применяют автогенераторы. Работа автогенераторов и их схемы были рассмотрены в § 41 (см. рис. 106—109). Задающий генератор может быть выполнен по любой из этих схем.

Большое значение имеет режим работы транзистора или лампы в схеме генератора. К. п. д. каскада будет большим, если рабочая точка выбрана в самом начале характеристики (режимы с отсечкой). Это относится и к генераторам. Но в таком режиме колебания в контуре генератора возникают резко, скачком и только при сильной обратной связи. Такой режим самовозбуждения называется *жестким* и на практике почти не применяется.

Если же рабочая точка расположена на крутой прямолинейной части характеристики лампы или транзистора, то колебания возбуждаются легко, амплитуда их нарастает постепенно. Это *мягкий* режим самовозбуждения. Но к. п. д. генератора в этом режиме очень мал. Такое противоречие устраняется применением автоматического смещения на базу транзистора или сетку лампы. Для этой цели служат, например, резистор $R_б$ (см. рис. 107, *б*) и резистор $R_с$ (см. рис. 107, *а*).

Посмотрим, как возникает самовозбуждение в схеме, показанной на рис. 106, *б*. При включении источника питания коллекторной цепи $E_к$ в контуре возникают колебания и в катушке обратной связи $L_{св}$ индуктируется переменная э. д. с. Схема выполнена на транзисторе *p-n-p*, поэтому отрицательные полупериоды переменного напряжения на базе отпирают его. В цепи базы возникают импульсы тока, а на резисторе $R_б$ происходит падение напряжения. Конденсатор $C_б$, включенный параллельно резистору $R_б$, сглаживает пульсации напряжения.

Таким образом, на резисторе $R_б$ возникает напряжение смещения. Проследив направление тока базы (на рис. 106, *б* показано стрелками), можно убедиться, что это напряжение положительно по отношению к базе. По мере возрастания амплитуды колебаний в контуре постепенно растет напряжение смещения, сдвигая рабочую точку в начало характеристики. (Здесь имеется в виду проходная или сквозная характеристика транзистора, т. е. зависимость коллекторного тока от напряжения между базой и эмиттером). Так устанавливается наиболее выгодный режим работы автогенератора.

Резистор $R_б$ может быть включен между базой и эмиттером, как это показано на рис. 107, *б* и 108, *б*. Применение автоматического смещения на базу выгодно еще и потому, что оно стабилизирует режим работы транзистора. Если по каким-либо случайным причинам, например при изменении температуры, изменится амплитуда колебаний в контуре, то соответственно изменится положительное смещение на базе. Рабочая точка переместится к началу характеристики, и импульсы коллекторного тока уменьшатся.

Аналогичные процессы происходят в схеме на электронной лампе, где применяется смещение от сеточного тока (см. рис. 107, *а*). Отличие состоит лишь в том, что лампа открывается при положительном полупериоде э. д. с. в катушке обратной связи, а на резисторе $R_с$ создается отрицательное напряжение смещения на сетку.

Работа генератора характеризуется следующими величинами: колебательной (полезной) мощностью в контуре $P_к$;

мощностью потерь на аноде лампы $P_а$, которая затрачивается на нагрев анода;

подводимой мощностью P, которую генератор получает от анодного источника, $P = P_к + P_а$.

Если по каким-либо причинам колебания в контуре не возникают, например в случае обрыва в цепи контура, то вся мощность, получаемая от источника анодного питания, затрачивается на нагрев анода лампы. При этом анод перегревается и лампа может выйти из строя. Даже в том случае, если контур не настроен на частоту переменного напряжения на сетке и колебания в нем имеют небольшую амплитуду, на аноде лампы может выделяться недопустимо большая мощность. Поэтому при настройке мощного передатчика соблюдают меры предосторожности. Контур в анодной цепи настраивают при пониженном анодном напряжении, а контур в цепи антенны — при слабой связи с антенной.

К. п. д. каскада определяется формулой

$$\eta = \frac{P_к}{P}.$$

К. п. д. зависит от того, в каком режиме работает лампа. В промежуточных и выходных каскадах мощных передатчиков низкий к. п. д. недопустим.

Некоторые маломощные генераторы, например в измерительной аппаратуре, работают в *режиме колебаний первого рода* без отсечки анодного тока. Этот режим аналогичен режиму класса A в усилителях звуковой частоты. Переменная составляющая анодного тока в этом режиме будет синусоидальной. Однако форма анодного тока в генераторах не имеет такого большого значения, как в усилителях низкой частоты. Поэтому режим колебаний первого рода, имеющий низкий к. п. д., редко применяют в генераторах.

Значительно выгоднее *режим колебаний второго рода* с отсечкой анодного тока. Этот режим имеет много общего с режимом класса B в усилителях низкой частоты. Рабочую точку (р. т.) выбирают в начале динамической характеристики анодного тока (рис. 155), а иногда и за пределами характеристики. Анодный ток имеет форму импульсов. Высота импульсов, угол отсечки θ, а следовательно, длительность промежутков между импульсами зависят от величины напряжения смещения $E_с$ и амплитуды возбуждения U_{mc}. В промежутках между импульсами анодный ток отсутствует, энергия на нагрев анода не расходуется. Пополнение потерь энергии в контуре происходит так же, как и в режиме колебаний первого рода, а потери на нагрев анода уменьшаются. Поэтому к. п. д. в режиме колебаний второго рода выше, чем в режиме колебаний первого рода.

Однако режим работы с отсечками имеет и недостатки. Ток в анодной цепи имеет несинусоидальную форму, а следовательно, кроме основной частоты содержит целый ряд других частот, кратных основной (гармоник). Но во всех случаях, помимо умножения частоты, контур в анодной цепи генератора настроен на частоту переменного напряжения на сетке, т. е. на первую гармонику тока. В контуре

возникают колебания только этой частоты, так как для токов всех других частот он имеет малое сопротивление. При несинусоидальном анодном токе колебания в контуре имеют синусоидальную форму. Контур «отфильтровывает» высшие гармоники. Этим и объясняется то, что форма анодного тока в генераторах не имеет такого большого значения, как в усилителях низкой частоты.

Полностью подавить высшие гармоники удается не всегда. Хотя и слабо, они воздействуют на антенну передатчика и излучаются в окружающее пространство. Уменьшить излучение гармоник можно,

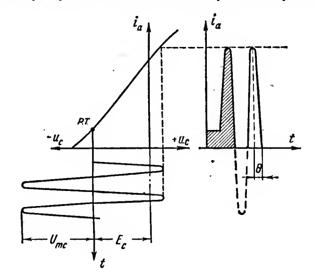


Рис. 155. Режим колебаний второго рода

применяя контуры, настроенные на основную частоту. Чем больше контуров имеет передатчик, тем лучше обеспечивается подавление гармоник.

Соотношение между амплитудами гармоник зависит от угла отсечки анодного тока. Установлено, что при угле отсечки $\theta = 120°$, высшие гармоники относительно малы, а составляющая основной частоты имеет наибольшую амплитуду. Поэтому при работе каскада в режиме усиления выгодно выбирать $\theta = 120°$. При умножении частоты угол отсечки выбирают другим. Расчеты показывают, что наибольшая амплитуда второй гармоники получается при угле отсечки 60°, а третьей — при 40°. Такую отсечку и нужно обеспечить при удвоении или утроении частоты.

При умножении частоты в промежуточном и выходном каскадах передатчика необходимо подавить частоту возбудителя, чтобы колебания этой частоты не излучались антенной. Это является более трудной задачей, чем фильтрация гармоник, и требует большого числа колебательных контуров. При работе генератора с сеточными токами

напряжение на сетке в некоторые моменты времени положительно. При этом анодный ток лампы имеет наибольшее значение и дает наибольшее падение напряжения на нагрузке. Нагрузкой в анодной цепи лампы является параллельный контур, сопротивление которого при резонансе велико. Напряжение анодного источника в любой момент времени равно сумме напряжения между анодом и катодом и напряжения на нагрузке. Следовательно, в те моменты, когда увеличивается напряжение на нагрузке, на аноде оно уменьшается. Именно в те моменты, когда на сетке наибольший положительный потенциал, напряжение на аноде будет наименьшим.

Если напряжение возбуждения на сетке лампы имеет большую амплитуду, то в некоторые моменты оно может оказаться равным напряжению на аноде и даже стать больше него. В связи с этим различают недонапряженный, критический и перенапряженный режимы работы генератора.

В недонапряженном режиме при всех изменениях напряжения на сетке оно остается меньше напряжения на аноде. Это может быть лишь при малой амплитуде напряжения возбуждения. При этом переменная составляющая тока мала, колебательная мощность $P_к$ также мала и к. п. д. каскада в этом режиме получается небольшим. Более выгодным является критический режим, при котором наибольшее напряжение на сетке равняется наименьшему напряжению на аноде. При дальнейшем увеличении амплитуды возбуждения или неправильном выборе сопротивления нагрузки (резонансное сопротивление анодного контура) может возникнуть перенапряженный режим. Он невыгоден, так как форма анодного тока недопустимо искажается, импульс «раздваивается», а к. п. д. возрастает лишь на несколько процентов. Поэтому ламповые генераторы чаще всего работают в критическом или несколько недонапряженном режиме.

§ 48. УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Усилитель мощности передатчика может содержать несколько каскадов. Первые каскады называются *промежуточными*, в них маломощные колебания задающего генератора усиливаются до величины, достаточной для возбуждения мощного выходного каскада. *Выходной* или *оконечный* каскад обеспечивает заданную мощность в антенне передатчика. Промежуточные каскады выполняют по схеме генератора с независимым или внешним возбуждением. Оконечный каскад собирают по простой или сложной схеме.

В выходном каскаде, выполненном по простой схеме, антенну включают непосредственно в анодную цепь лампы. Недостатком такой схемы является то, что передатчик излучает кроме основной частоты еще целый ряд гармоник и создает помехи расположенным поблизости приемникам.

Сложная схема выходного каскада маломощного передатчика показана на рис. 156. В анодную цепь включен колебательный контур, который настраивают на частоту переменного напряжения

на сетке конденсатором $C_к$. С катушкой контура $L_к$ индуктивно связана катушка антенны L_A. Антенная цепь настраивается в резонанс с контуром $L_к C_к$ изменением индуктивности и емкости. Для грубой настройки этой цепи служит переключатель, изменяющий индуктивность катушки L_A, для плавной настройки — конденсатор C_A. Когда антенная цепь настроена точно на частоту колебаний контура $L_к C_к$, индикаторная лампочка $Л$ горит наиболее ярко. После настройки антенной цепи лампочка выключается (замыкается накоротко) ключом K. Для настройки антенной цепи может быть использован и вариометр. В мощных передатчиках для получения наибольшего то-

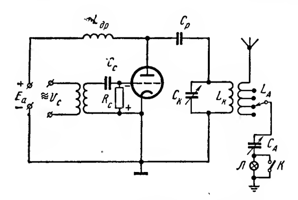


Рис. 156. Сложная схема выходного каскада

ка в антенне, кроме того, подбирают наивыгоднейшую связь анодного контура и антенной цепи.

Изменение параметров антенны и режима работы выходного и промежуточных каскадов не должно влиять на работу задающего генератора. Чтобы ослабить это влияние, непосредственно за задающим генератором включают *буферный каскад*. В передатчиках, выполненных на электронных лампах, это усилительный каскад, работающий без токов управляющей сетки и собранный на пентоде или тетроде.

Все рассмотренные схемы промежуточных и выходных каскадов могут быть выполнены на электронных лампах (триоды, тетроды, пентоды) и на транзисторах. Для мощных передатчиков выпускают специальные генераторные лампы.

В промежуточных каскадах коротковолновых передатчиков часто производят *умножение частоты*. При этом возбудитель работает на сравнительно низкой частоте, а контур в анодной цепи промежуточного каскада настраивается на частоту в два или три раза более высокую (на вторую или третью гармонику).

При умножении легче обеспечить стабилизацию частоты передатчика. Кроме того, при этом уменьшается влияние анодной цепи промежуточного каскада на цепь сетки, так как контуры в этих це-

пях настроены на разные частоты. Это увеличивает устойчивость работы схемы. Однако к. п. д. каскада в режиме умножения частоты ниже, чем в режиме усиления.

§ 49. СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ В РАДИОПЕРЕДАТЧИКАХ

Каждому передатчику отводится определенная частота, которая во время работы передатчика должна оставаться постоянной. Но есть много факторов, которые влияют на частоту и изменяют ее. Необходимо принимать специальные меры, чтобы стабилизировать частоту передатчика. Существуют две системы стабилизации частоты: параметрическая и кварцевая.

Параметрическая стабилизация заключается в подборе таких параметров и элементов схемы, при которых частота генератора мало зависит от внешних причин. При работе радиостанции температура окружающей среды может изменяться в широких пределах. Кроме того, расположенные вблизи деталей контура другие детали схемы, например лампы, в процессе работы нагреваются.

При изменении температуры, хотя и в слабой степени, меняются линейные размеры конденсатора и катушки, диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, сопротивление проводов. Следовательно, изменяются емкость и индуктивность контура. Чтобы уменьшить влияние температуры, применяют материалы, которые мало меняют свои свойства при ее изменении. В качестве диэлектриков используют особые сорта керамики (радиокерамику). Пластины конденсатора изготовляют из специальных сплавов.

Задающий генератор выполняют на лампе малой мощности, чтобы она не нагревалась при работе. В тех случаях, когда частота генератора должна быть особенно устойчивой, его помещают в термостат. Это устраняет также влияние изменения влажности и атмосферного давления. При повышении температуры емкость конденсатора и индуктивность катушки намного увеличиваются. Чтобы скомпенсировать эти изменения, параллельно конденсатору контура включают дополнительный конденсатор с диэлектриком из тиконда. При нагревании емкость тикондового конденсатора уменьшается. Общее изменение емкости контура при изменении температуры будет очень малым.

На частоту автогенератора влияет также изменение питающих напряжений. При работе лампы вокруг катода образуется пространственный заряд. От его объема и плотности зависят междуэлектродные емкости лампы. При изменении постоянных напряжений на электродах меняется объемный заряд, а следовательно, величины междуэлектродных емкостей. Это влияет на частоту, в особенности в генераторах дециметровых и сантиметровых волн. Все питающие напряжения генератора должны быть постоянны. С этой целью в цепь накала генераторной лампы включают бареттер, а питание анода и экранной сетки осуществляют через стабилизатор.

Параметрическую стабилизацию легче осуществить, когда возбудитель работает на сравнительно низкой частоте. Если частота

возбудителя, например, 0,25 МГц, то изменение ее на 1% будет равно отклонению от заданной частоты всего на 2,5 кГц. Если же возбудитель работает на частоте 3 МГц, то изменение ее на 1% составит 30 кГц. При таком большом изменении частоты прием у корреспондента прекратится. Поэтому параметрическую стабилизацию обычно осуществляют в схемах, работающих с умножением частоты. Механические вибрации деталей возбудителя также влияют на его частоту. Это особенно учитывают при конструировании передвижных радиостанций, применяя прочное крепление деталей и жесткий монтаж.

Кварцевая стабилизация. Параметрическая стабилизация осуществляется при работе передатчика на всех частотах заданного диапазона. В отличие от нее кварцевая стабилизация может осуществляться только на одной или нескольких кратных частотах.

Принцип кварцевой стабилизации заключается в том, что в схему возбудителя включают особым образом вырезанную пластинку кварца (горного хрусталя). Кварц обладает свойством пьезоэлектрического эффекта. При сжатии или растяжении кварцевой пластинки на ее гранях возникают электрические заряды (явление прямого фотоэффекта). Если же пластинку поместить в электрическое поле, то она будет сжиматься или растягиваться в направлении поля (обратный пьезоэффект). Но сжатие или растяжение вызывает появление зарядов на гранях пластинки, поэтому обратный пьезоэффект всегда сопровождается прямым.

Кварцевую пластинку помещают в кварцедержателе между двумя металлическими обкладками. К обкладкам подводят переменное напряжение, под действием которого пластинка совершает механические колебания, периодически сжимаясь и растягиваясь. При этом возникает переменное напряжение на ее гранях, частота которого (частота собственных колебаний кварцевой пластинки) зависит от размеров пластинки.

Пластинка имеет несколько частот собственных колебаний. Обычно используют так называемые колебания по толщине. При этом собственная частота кварца определяется формулой

$$f = \frac{2,84}{b},$$

где f — частота колебаний, МГц; b — толщина пластинки, мм.

Пластинка толщиной 1 мм имеет частоту 2,84 МГц (длина волны около 105 м). Очень тонкую пластинку изготовить трудно, поэтому в передатчиках, работающих с кварцем, обычно применяют умножение частоты. Возбудитель работает на сравнительно низкой частоте, а в последующих каскадах частота увеличивается в 2—3 раза и более.

Кварцевая пластинка по своим свойствам эквивалентна колебательному контуру. На рис. 157 показана схема замещения кварца. Левая ветвь схемы состоит из элементов $C_к$, $L_к$ и $r_к$, характеризующих свойства кварцевой пластинки, а правая содержит емкость C_0, зависящую от конструкции кварцедержателя. Если подсчитать добротность такого контура, то окажется, что она достигает нескольких десятков тысяч. Собственная частота кварцевой пластинки опре-

деляется величинами $L_к$ и $C_к$, которые образуют последовательный колебательный контур. Собственная частота всей схемы f_0, с учетом емкости C_0, выше частоты $f_к$, но близка к ней. (Емкость C_0 внутри контура включена последовательно с емкостью $C_к$.)

Таким образом, кварц, помещенный в кварцедержатель, эквивалентен колебательному контуру с высокой добротностью, имеющему две резонансные частоты $f_к$ и f_0.

Кварц может быть включен в схему несколькими способами. Чаще всего его включают в цепь сетки (рис. 158); такая схема называется осцилляторной. Резонансная частота контура $L_к$ $C_к$ в анодной цепи этой схемы должна лежать в пределах от $f_к$ до f_0. При включении

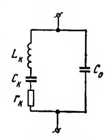


Рис. 157. Схема замещения кварца

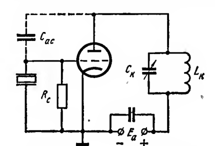


Рис. 158. Схема генератора с кварцем в цепи сетки

схемы в контуре $L_к$ $C_к$ возникают свободные колебания, которые через емкость C_{ac} воздействуют на кварцевый контур. Частота колебаний этого контура очень стабильна. Переменное напряжение, которое подается с кварца на сетку лампы, поддерживает устойчивую частоту колебаний в контуре.

Так как кварц не имеет проводимости для постоянного тока, то параллельно ему включают сопротивление утечки R_c. Чтобы оно не шунтировало кварц и не снижало его добротности, нужно выбирать R_c достаточно большим. На сопротивлении R_c создается также напряжение автоматического смещения.

Кварцевая стабилизация особенно удобна для передатчиков, работающих на одной определенной частоте, например для радиовещательных станций. Если же радиостанция должна работать на разных частотах, то для каждой частоты нужна отдельная кварцевая пластинка. Существуют схемы кварцевой стабилизации и в плавном диапазоне частот, но они сложны.

§ 50. УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Для передачи каких-либо сообщений необходимо управлять колебаниями передатчика, т. е. осуществлять манипуляцию или модуляцию колебаний.

Манипуляция

При работе радиотелеграфного передатчика сигналы создаются ключом или телеграфным аппаратом и воздействуют на колебания высокой частоты. Этот процесс называется *манипуляцией*. В простейшем случае, например при радиолюбительской связи, *амплитудная манипуляция* осуществляется при помощи телеграфного ключа. Работу ключом выполняют в соответствии с азбукой Морзе,

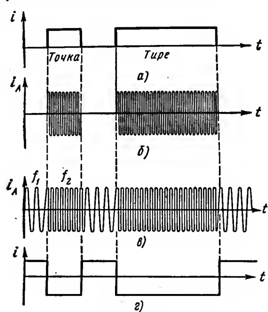


Рис. 159. Телеграфная манипуляция:

а — первичные телеграфные сигналы, *б* — ток в антенне передатчика при амплитудной манипуляции, *в* — ток в антенне передатчика при частотной манипуляции, *г* — ток в приемнике

где каждая буква или цифра обозначается определенным сочетанием точек и тире (рис. 159). При нажатом ключе передатчик излучает колебания с определенной амплитудой, при отжатом ключе амплитуда колебаний падает до нуля, излучение прекращается (рис. 159,*б*). Прием ведется на слух.

Скорость передачи ключом очень мала. Радист может передавать около 30—40 слов в минуту, поэтому на магистральных линиях радиосвязи применяют телеграфные аппараты. Они работают с большей скоростью и, кроме того, позволяют вести прием непосредственно на телеграфную ленту. Но телеграфный аппарат регистрирует и помехи, которые возникают во время паузы. Чтобы уменьшить влияние помех, применяют ч а с т о т н у ю м а н и п у л я ц и ю. Во время передачи сигнала ток в антенне имеет одну частоту, а во время паузы — другую (рис. 159,*в*).

В приемнике ток одной частоты превращается в постоянный ток определенного направления, а ток другой частоты — в постоянный ток противоположного направления (рис. 159,*г*). Частотная манипуляция не только уменьшает влияние помех, но и уменьшает спектр частот, излучаемых передатчиком.

Модуляция

Процесс управления колебаниями высокой частоты при передаче речи, музыки или телевизионных сигналов называется *модуляцией*. Переменный ток высокой частоты, который протекает в антенне пере-

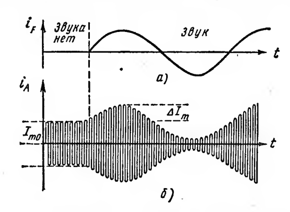


Рис. 160. Амплитудная модуляция:
а — колебания звуковой частоты (первичный сигнал), *б* — ток в антенне передатчика

датчика при отсутствии сигнала, называется *током несущей частоты*. Он характеризуется определенной амплитудой, частотой и фазой. Зависимость тока от времени может быть выражена уравнением

$$i = I_{m0} \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где I_{m0} — амплитуда тока; ω_0 — частота тока; φ_0 — фаза тока.

Передаваемые сигналы могут воздействовать на одну из этих величин. В соответствии с этим различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции. Радиоаппаратура в основном работает с амплитудной и частотной модуляцией. В некоторых видах аппаратуры применяется также импульсная модуляция.

Амплитудная модуляция (АМ) наиболее часто применяется при радиотелефонии, т. е. передаче сигналов звуковой частоты. Амплитуда тока высокой частоты изменяется в такт звуковым колебаниям (рис. 160, *а*, *б*). Действительное соотношение между звуковой и несущей частотами на графике показать невозможно: на одно колебание звуковой частоты приходятся тысячи высокочастотных колебаний. Но из графика видно, что огибающая колебаний высокой частоты повторяет форму тока звукового сигнала i_F.

Глубина модуляции, т. е. степень изменения амплитуд высокочастотного колебания, в простейшем случае зависит от силы звука. Чем громче звук, тем больше глубина модуляции. Для количественной оценки служит коэффициент модуляции, равный отношению прироста амплитуды тока несущей частоты к амплитуде тока до модуляции. Коэффициент модуляции m обычно выражают в процентах:

$$m = \frac{\Delta I_m}{I_{m0}} \cdot 100\,\%,$$

где ΔI_m — прирост амплитуды тока при модуляции; I_{m0} — амплитуда тока до модуляции.

При нормальной работе коэффициент модуляции 30—80%.

Процесс амплитудной модуляции не является сложением колебаний высокой и низкой частоты. Это более сложный процесс.

Модуляцию колебаний высокой частоты в передатчиках и некоторые другие процессы в радиоаппаратуре, например, детектирование и преобразование частоты в приемниках, осуществляют при помощи *нелинейных элементов цепи*. Известно, что закон Ома выражает зависимость между напряжением, приложеным к данному сопротивлению, и протекающим по нему током:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Ток в цепи изменяется пропорционально напряжению. Зависимость тока в цепи от приложенного к ней напряжения называется *вольт-амперной характеристикой цепи*.

Закон Ома справедлив для цепи постоянного и переменного тока с активным сопротивлением, а также для действующих значений переменных токов и напряжений в цепях с индуктивностью или емкостью. При этом предполагается, что активное сопротивление, индуктивность и емкость постоянны, не зависят от напряжения и тока в цепи, т. е. являются линейными элементами. Вольт-амперная характеристика цепи, состоящей из линейных элементов, изображается прямой линией (рис. 161,*а*).

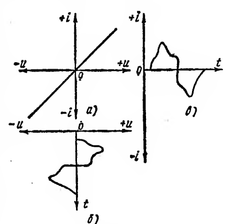


Рис. 161. Воздействие переменного напряжения на цепь с линейными элементами:

а — вольт-амперная характеристика линейной системы, *б* — график напряжения, *в* — график тока

Рассуждая строго, активное сопротивление, емкость и индуктивность изменяются при изменении тока или напряжения. Однако в большинстве случаев изменения этих величин так незначительны, что ими пренебрегают и считают все элемен-

ты электрической цепи линейными. Если к линейной цепи приложить переменное напряжение (рис. 161,*б*), то, как видно из графика, изображенного на рис. 161,*в*, форма тока в цепи в точности соответствует приложенному напряжению. При воздействии переменного синусоидального напряжения с частотой $\omega = 2\pi f$ точно такую же частоту будет иметь и ток.

Но во многих случаях принципиально необходимы нелинейные элементы, характеристики которых отличаются от прямой. Примером может служить выпрямитель, в цепи которого при приложенном переменном напряжении должен протекать выпрямленный пульсирующий ток.

В радиотехнике наиболее часто приходится иметь дело с характеристиками электронных ламп и транзисторов. Эти характеристики имеют прямолинейные участки. При работе в пределах этого участка лампа и транзистор могут считаться линейными элементами. Если же при работе используются и криволинейные участки, то возникают нелинейные искажения. При рассмотрении вопроса о нелинейных искажениях было показано, что при этом на выходе устройства возникают новые частоты, которых не было на входе. Это является принципиальным отличием работы нелинейных систем и имеет большое значение для осуществления процесса модуляции.

При амплитудной модуляции на входе модулируемого каскада действуют переменные напряжения несущей и звуковой частот, а на выходе каскада кроме этих частот получаются и другие. Следовательно, модулируемый каскад передатчика является нелинейным элементом. Другими словами, он должен всегда работать в режиме колебаний второго рода. При работе этого каскада в режиме колебаний первого рода (на прямолинейном участке характеристики лампы) модуляцию осуществить нельзя.

Теория и практика показывают, что *модулированные колебания являются суммой нескольких высокочастотных колебаний с разными частотами и амплитудами.* Если модуляция осуществляется простым, т. е. синусоидальным звуком с частотой F, то модулированное колебание содержит три составляющие: колебание несущей частоты f; колебание верхней боковой частоты $f + F$; колебание нижней боковой частоты $f - F$. Например, если несущая частота 1 МГц, а звуковая 1 кГц, то верхняя боковая частота 1001 кГц, а нижняя 999 кГц. Амплитуды боковых колебаний одинаковы и всегда меньше половины амплитуды колебания несущей частоты.

Состав модулированного колебания можно показать при помощи спектральной диаграммы (рис. 162). На горизонтальной оси откладывают частоты, вертикальные отрезки соответствуют амплитудам колебаний.

При модуляции сложным звуком, который состоит из нескольких синусоидальных колебаний, состав модулированного колебания более сложен. Каждый простой звук, т. е. каждый тон, дает свою пару боковых частот. В результате образуется верхняя и нижняя боковые полосы частот (рис. 163). Передатчик излучает целый спектр частот. Общая ширина спектра определяется теми составляющими, частоты

которых наиболее отличаются от несущей. Эти составляющие возникают при воздействии звука самого высокого тона. Следовательно, ширина спектра зависит от наивысшей частоты модуляции, равной удвоенной верхней частоте. Для передачи речи достаточна полоса звуковых частот до 3000 Гц. Это соответствует ширине спектра частот передатчика 6 кГц. При высоком качестве передачи музыки верхняя звуковая частота составляет 15—20 кГц, что соответствует ширине спектра 30—40 кГц. На такую полосу частот и следовало бы проектировать радиоаппаратуру. Но практически полоса пропускания аппаратуры бывает меньше. При этом самые нижние и самые верхние боковые частоты не воспроизводятся и форма передаваемого сигнала несколько искажается.

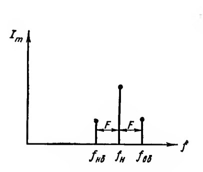


Рис. 162. Спектральная диаграмма АМ колебания при модуляции одним тоном

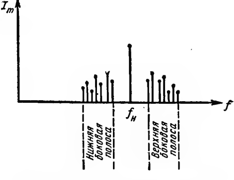


Рис. 163. Спектральная диаграмма АМ колебания при модуляции сложным звуком

Сужение спектра частот необходимо по многим причинам. Во-первых, обеспечить широкую полосу пропускания всего тракта радиосвязи или радиовещания технически очень трудно. Аппаратура получается сложной. Во-вторых, при современном уровне развития техники много радиопередатчиков работают одновременно. Каждому из них должна быть отведена определенная полоса частот. В диапазоне средних и даже промежуточных волн имеется мало частот, и передатчикам в этих диапазонах «тесно». И, наконец, в-третьих, сужение полосы пропускания радиотелефонной аппаратуры до 9—10 кГц внесет вполне допустимые искажения.

При амплитудной модуляции мощность колебаний несущей частоты составляет $^2/_3$ всей мощности модулированного сигнала. На обе боковые полосы приходится лишь около $^1/_3$ всей мощности. Но передаваемый сигнал, например колебание звуковой частоты, содержится именно в колебаниях боковых полос. При этом каждая из боковых полос включает передаваемый сигнал полностью, т. е. содержит всю передаваемую информацию. Следовательно, для передачи достаточно обеспечить излучение антенной одной боковой полосы частот, а несущую частоту, необходимую для работы детектора при-

емника, создавать в самом приемнике. Такая передача, называемая *однополосной*, очень выгодна. Во-первых, передатчик занимает полосу частот вдвое уже, чем, при обычной передаче. Это уменьшает взаимные помехи линий связи и дает возможность разместить большее число передатчиков в одном и том же диапазоне частот. Во-вторых, передатчик должен обеспечить мощность только одной боковой полосы, что дает выигрыш в мощности в 4 раза. В-третьих, приемник может иметь более узкую полосу пропускания и, значит, большую избирательность. Это также эквивалентно значительному выигрышу в мощности.

Однополосная передача широко используется в современной радиотелефонной связи на коротких волнах и УКВ. Недостатком ее является усложнение приемника. Гетеродин приемника, восстанавливающий несущую частоту, должен иметь очень высокую стабильность. Для этого часто используют очень слабое излучение остатков несущей частоты передатчика, так называемый пилот-сигнал. В целом же приемник получается сложным, и поэтому в радиовещании однополосную систему передачи пока не применяют.

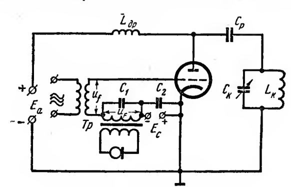


Рис. 164. Схема сеточной модуляции

Амплитудная модуляция. Амплитудная модуляция осуществляется в одном из промежуточных каскадов передатчика. В схеме возбудителя ее не применяют, так как при этом снижается стабильность частоты передатчика. В соответствии с колебаниями звуковой частоты изменяется напряжение на аноде или одной из сеток лампы промежуточного каскада. По этому признаку различают схемы сеточной, анодной и анодно-экранной модуляции.

Одной из распространенных схем является схема сеточной модуляции, в которой звуковой сигнал воздействует на управляющую сетку лампы (рис. 164). Источником напряжения звуковой частоты служит микрофон, включенный в первичную обмотку трансформатора Tp. На вторичной обмотке создается напряжение звуковой частоты u_F, которое периодически складывается с напряжением E_c или вычитается из него. Одновременно на управляющую сетку действует напряжение высокой частоты с предыдущего каскада пе-

редатчика. Для токов высокой частоты источник смещения и вторичная обмотка микрофонного трансформатора зашунтированы конденсаторами C_1 и C_2.

Напряжение смещения и амплитуду высокочастотных колебаний выбирают так, чтобы обеспечить работу лампы с отсечками анодного тока. Следовательно, анодный ток будет импульсным (рис. 165). При отсутствии звука высота импульсов анодного тока неизменна. При воздействии звука импульсы тока изменяются в соответствии с изменениями тока в микрофоне. В колебательный контур $L_к$ $C_к$ подается большее или меньшее количество энергии, и переменный ток в контуре, а следовательно, и в антенной цепи будет модулированным.

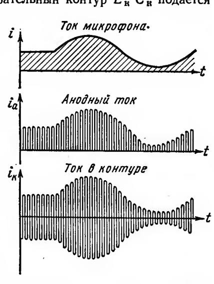


Рис. 165. Графики процесса сеточной и анодной модуляции

Такую схему применяют в маломощных передатчиках, где все питающие напряжения сравнительно невелики. В передатчиках большой мощности колебания звуковой частоты, возникающие на вторичной обмотке трансформатора, усиливаются ступенями усиления низкой частоты и только после этого подаются в цепь сетки модуляторной лампы. Усилитель низкой частоты вместе с микрофоном называется *модуляционным устройством или модулятором.*

В каскадах с мощными триодами используют схему анодной модуляции (рис. 166). Напряжение звуковой частоты усиливается лампой модулятора. Нагрузкой этой лампы служит трансформатор низкой частоты *Тр*, на вторичной обмотке которого возникает усиленное напряжение звуковой частоты. Через эту обмотку подается анодное питание на лампу генератора. Под воздействием звуковых колебаний напряжение на аноде генераторной лампы меняется со звуковой частотой. Напряжение смещения, снимаемое с резистора $R_с$, обеспечивает работу лампы с отсечками анодного тока. Импульсы анодного тока изменяются по высоте, и колебания в контуре становятся модулированными. Кривые токов, приведенные на рис. 165, соответствуют физическим процессам и в данной схеме.

В передатчиках малой и средней мощности в качестве генераторных ламп используют пентоды и лучевые тетроды. Если подавать напряжение звуковой частоты на экранную сетку, то получится модуляция на экранную сетку, а если подавать его и на анод и на экранную сетку, то можно осуществить а н о д н о-э к р а н н у ю м о д у л я ц и ю. Анодно-экранная модуляция позволяет лучше использовать лампу, получить большую полезную мощность.

Частотная модуляция (ЧМ). При частотной модуляции передаваемый сигнал воздействует на частоту колебаний передатчика. На рис. 167 видно, что при отсутствии сигнала в антенне передатчика протекает немодулированный ток высокой частоты (ток несущей час-

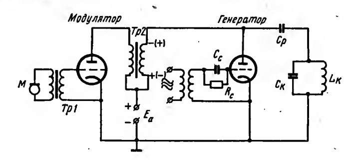


Рис. 166. Схема анодной модуляции

тоты). При воздействии сигнала частота колебаний меняется. На графике показан простейший случай модуляции синусоидально изменяющимся напряжением. В течение одного полупериода частота тока в антенне больше несущей частоты, в течение другого — меньше. Она

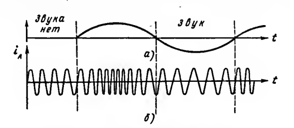


Рис. 167. Частотная модуляция:
а — колебания звуковой частоты (первичный сигнал), *б* — ток в антенне передатчика

изменяется в такт с изменением звукового сигнала. Чем громче звук, тем больше изменения частоты. Амплитуда тока в антенне остается неизменной.

Глубина модуляции, т. е. степень воздействия сигнала на несущую частоту, в этом случае оценивается девиацией частоты. *Девиация частоты* — наибольшее отклонение ее от среднего значения (от несущей частоты).

На графике (рис. 167,*б*) показан только принцип частотной модуляции. Чтобы сделать график более наглядным, изменения частоты показаны слишком резкими. В действительности в процессе модуляции частота изменяется лишь на десятые доли процента. Например, при несущей частоте 30 МГц изменения частоты составляют 20 кГц. Отношение девиации частоты Δf к частоте модуляции F называется

индексом модуляции и обозначается mf:

$$m_f = \frac{\Delta f_{\text{макс}}}{F}.$$

Частотная модуляция имеет большое преимущество перед амплитудной, так как позволяет значительно ослабить помехи в радиоприемнике. Кроме того, в передатчиках ЧМ лучше используются лампы. При всех изменениях сигнала они работают на полной мощности. Однако частотная модуляция имеет и очень большой недостаток, ограничивающий ее применение в передатчиках длинных, средних и даже коротких волн. Дело в том, что передатчик ЧМ при передаче одного и того же сигнала излучает гораздо более широкую полосу частот, чем передатчик АМ.

Расчеты показывают, что в простейшем случае модуляции синусоидальным тоном колебание, модулированное по частоте, содержит не две боковые частоты, а бесконечно большое число их (рис. 168). Каждая последующая составляющая отличается от предыдущей на частоту, равную частоте модуляции F. Боковые частоты образуют спектры частот.

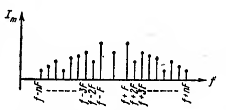


Рис. 168. Спектральная диаграмма ЧМ колебания

Соотношение амплитуд в спектре зависит от индекса модуляции m_f. Если m_f гораздо меньше единицы, то значительные амплитуды имеют только первые боковые частоты $f + F$ и $f - F$. В этом случае полоса пропускания аппаратуры может быть такой же, как при амплитудной модуляции. Это случай узкополосной частотной модуляции, при котором качество передач низкое, а помехи подавляются слабо.

При работе радиовещательных передатчиков, которые должны обеспечить высокое качество передачи сигнала, $m_f > 1$. При этом составляющие боковых частот имеют относительно большие амплитуды и для неискаженного воспроизведения сигнала аппаратура должна обеспечить полосу пропускания в несколько сотен килогерц.

Радиовещание с частотной модуляцией осуществляют на волнах короче 5 м. Более длинные волны не могут быть использованы по следующим причинам. Во-первых, широкую полосу пропускания имеют контуры, настроенные на достаточно высокую резонансную частоту. Во-вторых, в диапазоне средних, промежуточных и коротких волн с трудом размещаются даже АМ передатчики, каждый из которых занимает полосу частот всего 9 кГц. Метровый диапазон УКВ является значительно более «вместительным», и здесь возможна работа ЧМ передатчика, занимающего широкую полосу частот.

В отличие от амплитудной частотная модуляция должна осуществляться в задающем генераторе, так как влиять на частоту передатчика в последующих каскадах практически невозможно. Пе-

редаваемый сигнал, напрнмер колебанне звуковой частоты, воздействует на индуктнвность нлн емкость контура возбуднтеля.

Шнроко прнменяют в передатчиках ЧМ схему с реактнвной лампой, т. е. с электронной лампой, внутреннее сопротнвленне которой имеет ннదуктнвный нлн емкостный характер. Такая схема содержнт лампу н цепь RC, обеспечивающую сдвнг фаз между анодными током и напряженнем на 90°. Одна из такнх схем показана на рнс.196.

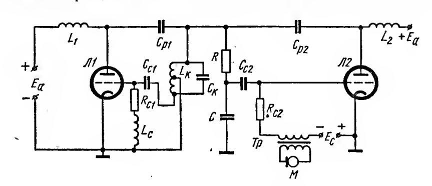


Рис. 169. Схема частотной модуляции с реактивной лампой

Возбуднтель собран на лампе *Л1* по трехточечной схеме с ннదуктивной обратной связью. Параллельно контуру возбуднтеля включена реактивная лампа *Л2*. Параллельно зажнмам анод — катод лампы *Л2* включена цепь нз резнстора R н конденсатора C. В этой цепн протекает переменный ток.

Сопротивление R выбирают большнм, чтобы емкостное сопротивленне конденсатора было значительно меньше R $\left(\frac{1}{2\pi fc} \ll R\right)$.

При этом можно считать, что ток I в цепн RC будет совпадать по фазе с переменным напряженнем U_a на аноде *Л2*.

На конденсаторе C возннкает переменное напряженне U_c (рнс. 170), которое отстает от тока в этой цепн, а следовательно, и от напряжения на аноде *Л2* на 90°. Напряженне U_c с конденсатора подается на сетку *Л2*, н в цепн анода возникает переменная составляющая тока, которая совпадает по фазе с сеточным напряженнем и отстает от напряжения на аноде прнблнзительно на 90°.

Рис. 170. Векторная диаграмма токов и напряжений в схеме с реактивной лампой

Такнм образом, переменный ток в анодной цепн лампы *Л2* отстает от переменного напряжения на аноде на угол, блнзкнй к 90°. Это нмеет место в цепн переменного тока с ннదуктнвностью. Следовательно, лампа нмеет реактнвное сопротивленне индуктнвного характера.

При работе мнкрофона в такт с колебаннямн звуковой частоты меняется крутизна хара-

ктеристики и амплитуда переменной составляющей анодного тока. При неизменном анодном напряжении это равносильно изменению реактивного сопротивления лампы, т. е. эквивалентной индуктивности. Так как реактивная лампа включена параллельно контуру возбудителя $L_к\,C_к$, то будет изменяться частота возбудителя.

Импульсная модуляция. За последние годы значительное распространение получили импульсные системы радиосвязи. В таких системах

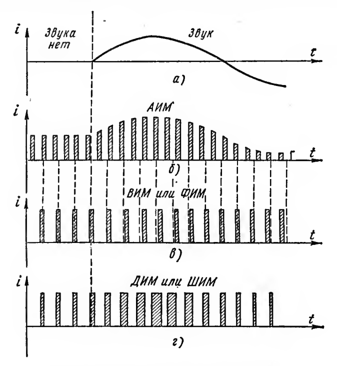


Рис. 171. Виды импульсной модуляции:
а — колебания звуковой частоты (первичный сигнал), б — модуляция по амплитуде, в — модуляция по фазе, г — модуляция по длительности импульса

передаваемый сигнал воздействует на прямоугольные импульсы постоянного тока. В дальнейшем эти импульсы преобразуются в импульсы токов высокой частоты, которые излучает антенна передатчика.

При воздействии передаваемого сигнала, например колебаний звуковой частоты (рис. 171, *а*), может изменяться амплитуда (высота), длительность (ширина) или частота чередования импульсов. В соответствии с этим различают несколько видов импульсной модуляции. При *амплитудно-импульсной модуляции* (АИМ) под действием сигнала изменяется амплитуда импульса (рис. 171,*б*). Этот вид модуляции не имеет широкого применения. Как и при амплитудной модуляции синусоидальных колебаний, в этом случае на линию радиосвязи сильно воздействуют помехи. Пропорционально напряжению сигна-

ла может измеияться и длительиость импульса (рис. 171, *г*). Этот внд модуляции иазывают длительио-нмпульсной (ДИМ) или *широтно-импульсной* (ШИМ). При *временной импульсной модуляции* (ВИМ) под воздействием модулнрующего напряжеиия импульсы смещаются по времеии (рис. 171, *в*). Этот вид модуляции иногда называют фазово-импульсиой (ФИМ).

§ 51. ПЕРЕДАТЧИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Частоты выше 30 МГц называют сверхвысокими (СВЧ). Геиерн-роваине колебанни СВЧ имеет ряд особеииостей. Для работы на СВЧ оказываются иепригодиымн обычные электроииые лампы н колебательные контуры, состоящне из коидеисаторов н катушек. На СВЧ оказывают влияине междуэлектродиые емкости ламп, нидуктнвности ламповых вводов, время пролета электрона в междуэлектродном пространстве. Все это снижает колебательную мощность и к.п.д. геиератора.

У каждой электронной лампы существует предельная частота. На частотах выше предельиой лампу нельзя использовать в схеме геиератора: колебання не будут возбуждаться. Поэтому электроиные лампы прнмеияют лншь иа сравнительио инзкнх частотах — в метровом диапазоие волн СВЧ. Для очень высоких частот становятся непрнгодными н транзисторы. Время пробега носнтелей зарядов (электронов и дырок) виутрн транзистора очеиь иевелнко, ио на СВЧ оио становится сонзмернмым с периодом колебаиня. Умеиьшается коэффнцнеит усилення транзистора по току β и колебательная мощиость в коитуре.

По этнм прнчинам передатчнки СВЧ резко отличаются от передатчиков другнх диапазонов воли.

Генераторы метровых волн

Для генерации колебаиий в метровом диапазоне воли (частоты 30—300 МГц) прнмеияют специальио разработанные лампы. В этом диапазоне наиболее часто используют трехточечиые схемы автогенераторов.

В диапазоне СВЧ непрнмеинма схема включення лампы с общнм катодом. Проходная емкость лампы для СВЧ представляет собой малое сопротнвленне. Через эту емкость возиикает паразнтная обратная связь. Кроме того, в схеме с общнм катодом при нзмененни частоты колебаний нзменяется обратная связь, т. е. иарушается режим работы генератора. Наивысшая частота геиернруемых колебаний в схеме с общнм катодом ииже, чем в схеме с общей сеткой. Поэтому в диапазоне метровых воли, а также и иа более коротких волнах шнроко прнменяют схему с общей сеткой.

Наиболее распространенная однотактная схема геиератора с общей сеткой изображена на рнс. 172. Для токов высокой частоты

сетка лампы заземлена через емкость C_3, а катод изолирован от корпуса через дроссели *Др1* и *Др2*. Между анодом и сеткой включен четвертьволновый короткозамкнутый отрезок линии, играющий роль колебательного контура. Постоянная составляющая сеточного тока создает на резисторе R_c напряжение смещения, определяющее режим работы генератора. Конденсаторы C_1, C_2, C_4 и C_5 — блокировочные.

Частота колебаний, генерируемых схемой, регулируется изменением длины отрезка линии $L_н$, а обратная связь — путем изменения индуктивности дросселей *Др1* и *Др2*. Изменение обратной связи почти не влияет на генерируемую частоту.

Рис. 172. Схема автогенератора метрового диапазона волн

Генераторы метровых волн часто работают на симметричный выход. В этом случае целесообразно использовать двухтактные схемы, одна из которых показана на рис. 173. Для переменных токов и напряжений сетки ламп заземлены через конденсаторы C_1 и C_2. В анодные и катодные цепи включены колебательные контуры. Каждый контур содержит виток провода и переменный конденсатор небольшой емкости. Входной колебательный контур, включенный в цепь катода, заземлен через конденсатор C_3, блокирующий анодный источник.

Напряжение возбуждения на сетке каждой лампы равно половине напряжения, выделяющегося на контуре. Для постоянной составляющей тока средняя точка входного контура соединена с минусом анодного источника через дроссель *Др1*. Выходной колебательный контур, включенный в анодные цепи ламп, для переменных токов заземлен через блокирующий конденсатор C_4. Питающее напряжение на аноды ламп подается через дроссель *Др2*.

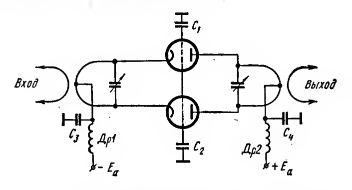


Рис 173. Схема двухтактного усилителя мощности метрового диапазона волн

В *диапазоне дециметровых волн* (частоты 300—3000 МГц) генераторы выполняют на триодах с дисковыми выводами (маячковые и металлокерамические триоды). Колебательными системами в этом диапазоне служат отрезки коаксиальных линий, которые удобно соединять с дисковыми выводами ламп. На этих частотах наиболее часто применяют однотактную схему генератора с общей сеткой.

Для генерирования и усиления колебаний в *диапазоне сантиметровых волн* применяют клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны и лампы обратной волны.

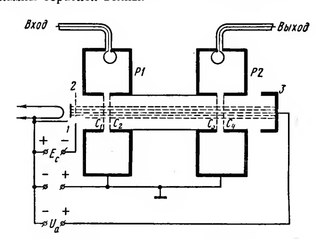


Рис. 174. Схема пролетного клистрона

Клистроны. В клистроне энергия источников питания преобразуется в переменный ток высокой частоты путем периодического изменения плотности потока электронов в вакууме. Колебательные системы в клистроне выполнены в виде объемных резонаторов. Различают пролетные (двухрезонаторные) и отражательные (однорезонаторные) клистроны.

В пролетном клистроне (рис. 174) электронный поток, создаваемый катодом *1*, фокусируется управляющей сеткой *2*, на которую подается небольшое напряжение E_c, отрицательное по отношению к катоду. Изменяя это напряжение, можно управлять электронным потоком. Под действием ускоряющего поля анода *3* электроны удаляются от катода и попадают в электрическое поле первого резонатора *Р1*, который вместе с двумя сетками *С1* и *С2* образует группирователь.

К резонатору *Р1* при помощи отрезка коаксиальной линии подведено переменное напряжение высокой частоты. При этом потенциалы сеток *С1* и *С2* попеременно изменяют свой знак. Когда потенциал сетки *С2* положителен, а сетки *С1* отрицателен, электроны в пространстве между сетками приобретают большую скорость (уско-

ряющее поле). Когда же потенциал сетки *C2* отрицателен, а сетки *C1* положителен, движение электронов замедляется (тормозящее поле).

При воздействии высокочастотного переменного напряжения электроны, прошедшие через сетки резонатора с меньшей скоростью, сблизятся с электронами, которые пройдут через сетки позднее, но с большей скоростью. Образуются сгустки и разрежения электронного потока, происходит группирование электронов. Возникает электронный поток с переменной плотностью.

На некотором расстоянии от резонатора *P1* помещен резонатор *P2*, который вместе с сетками *C3* и *C4* образует улавливатель. Через сетки улавливателя проходит электронный поток с переменной плотностью, который взаимодействует с электрическим полем резонатора *P2*. В момент, когда потенциал сетки *C4* отрицателен, а сетки *C3* положителен, сгустки электронов тормозятся полем резонатора и отдают ему часть энергии. В следующий момент, когда напряжение на сетках изменит знак, через резонатор пройдет участок электронного потока с меньшей плотностью. При этом небольшая часть энергии резонатора затрачивается на ускорение движения электронов.

Энергия сгруппированных электронов выделяется в резонаторе. Часть ее идет на покрытие потерь, а часть отводится в нагрузку. Далее электроны попадают на анод *3* (иногда его называют *коллектором*). Напряжение на аноде выбирают так, чтобы скорость электронов вблизи анода была близка к нулю. При этом большая часть энергии электронов отдается улавливателю.

Обычно резонатор *P2* настраивают на ту же частоту, что и резонатор *P1*, и колебания на выходе клистрона имеют ту же частоту, что и на входе. Но клистрон может работать и в режиме умножения частоты. Для этого резонатор *P2* настраивают на одну из гармоник входного напряжения.

Мы рассмотрели работу клистрона с посторонним возбуждением. Если же связать между собой резонаторы, например, при помощи волновода, то клистронный генератор может работать в режиме самовозбуждения. Частота генерируемых колебаний в этом случае определяется размерами резонаторов. Недостатком работы двухрезонаторного клистрона в режиме самовозбуждения является то, что оба резонатора должны быть точно настроены на одну частоту. При работе в диапазоне частот это трудно выполнить. Поэтому двухрезонаторные клистроны применяют в основном для усиления колебаний СВЧ или умножения частоты в радиопередатчиках. Их выпускают на частоты 400—10 000 МГц с мощностями от нескольких ватт до десятков киловатт.

В отражательном клистроне один и тот же резонатор является группирователем и улавливателем (рис. 175). Электронный поток, создаваемый катодом *1*, фокусируется и управляется напряжением на управляющей сетке *2*. Ускоряющее поле создается сетками *3*, имеющими положительный потенциал. При включении клистрона в резонаторе возникают свободные колебания, на сетках *3* появляется переменное напряжение, под действием которого электроны группируются по скорости. На отражатель *4* подается напряжение, отри-

цательное по отношению к катоду, поэтому электронный поток попадает в тормозящее поле отражателя и возвращается обратно к резонатору.

Напряжение на отражателе можно подобрать так, чтобы группы электронов возвращались к резонатору в тот момент, когда на сетке $C1$ отрицательный потенциал, а на сетке $C2$ положительный. Движение электронов тормозится, и они отдают часть своей энергии резонатору. Это повторяется периодически, и в резонаторе возникают незатухающие колебания СВЧ. Частота колебаний зависит от размеров резонатора и напряжения на отражателе.

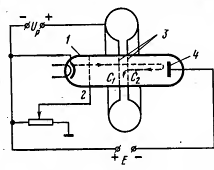


Рис. 175. Схема отражательного клистрона

Отражательные клистроны выполняют с внешним или внутренним резонатором.

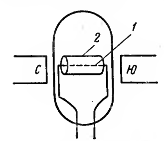
Устройство клистрона с внешним резонатором показано на рис. 176,*а*. В стеклянном вакуумном баллоне расположены катод *1*,

Рис. 176. Отражательные клистроны:

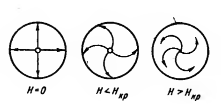
а — с внешним резонатором, *б* — с внутренним резонатором; *1* — катод, *2* — фокусирующий электрод, *3* — диски, *4* — отражатель, *5* — резонатор, *6* — сетки резонатора, *7* — ускоряющий электрод, *8* — винт настройки, *9* — пружина настройки, *10* — петля связи

фокуснрующий электрод *2*, ускоряющнй электрод *7*, сетки *6* резонатора н отражатель *4*. Резонатор *5* прн помощн днсков *3* соединен с сеткамн. Электронную настройку частоты пронзводят изменением напряжения на отражателе. Это сравннтельно простой способ, допускающнй нзмененне частоты в значнтельных пределах.

Клнстрон с внутреннвм резонатором нмеет металлнческую вакуумную оболочку, в которой помещены все электроды и объемный резонатор (рнс. 176, *б*). Настройку частоты осуществляют нзмененнем расстояння между днафрагмамн, образующнмн внутреннй резонатор. Клнстрон соеднняется с нагрузкой прн помощн петлн связн *10*. Петля соединена с отрезком коаксиальной лнннн, выведенной на цоколь клнстрона.



Рнс. 177. Днод в магнитном поле



Рнс. 178. Траектория движення электронов при различных значеннях напряжениостн магнитного поля в магнетроне

Отражательные клнстроны выпускают на небольшне мощностн — доли н еднннцы ватт. К.п.д. нх составляет всего несколько процентов, н колебательная мощность нзмеряется десяткамн и сотнями мнллнватт. Отражательные клнстроны прнменяют в маломощных передатчнках, напрнмер в аппаратуре раднорелейных и раднолокацнонных станцнй.

Магнетроны. Прннцнп действия магнетрона основан на управленни электронным потоком с помощью электрнческих н магнитных полей. Рассмотрнм простейшнй магнетрон — днод с катодом в внде ннтн, расположенной по осн цилнндрнческого анода (рнс. 177). Днод помещен в постоянное магнитное поле, направленное параллельно катоду *1*. На анод *2* подается постоянное напряженне, положнтельное по отношенню к катоду. Под действнем этого напряжения электроны, излучаемые катодом, летят к аноду в раднальных направленнях. Лннни магнитного поля направлены перпендикулярно к направлению двнження электронов, поэтому электроны отклоняются от прямолинейиого иаправления. Траекторни нх двнження нскривляются.

В завнснмости от напряжеиности магнитного поля H двнженне электронов пронсходит по-разному. На рнс. 178 показаны различные случаи движеиия электронов. Прн отсутствии магнитного поля

($H=0$) электроны движутся в радиальных направлениях. Если увеличивать напряженность магнитного поля, то траектория электронов искривляется. При определенном значении напряженности, называемом критическим ($H_{кр}$), происходит резкое уменьшение анодного тока, так как электроны только касаются анода и возвращаются обратно к катоду.

С поверхности катода вылетает огромное количество электронов. Они имеют высокие скорости и, следовательно, обладают большой

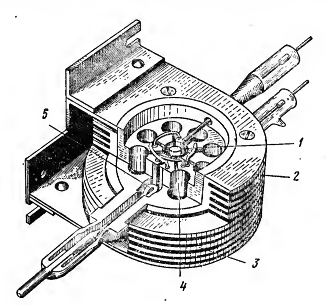


Рис. 179. Разрез многорезонаторного магнетрона

энергией. Если затормозить движение электронов, то эта энергия может быть использована для поддержания колебаний высокой частоты.

В настоящее время применяют многорезонаторные магнетроны. Первые конструкции таких магнетронов были разработаны советскими инженерами Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым в 1936—1937 годах. Анод *2* магнетрона выполнен в виде массивного медного цилиндра (рис. 179). Вдоль оси цилиндра имеется широкая полость, в которой помещен оксидный подогревный катод *1* с большой поверхностью. Вокруг центральной полости высверлено четное количество параллельных отверстий *4*, соединенных с центральной полостью продольными щелями.

Внутренняя полость каждого отверстия представляет собой объемный резонатор. В одном из резонаторов помещен виток провода *5* для связи с нагрузкой. Снаружи анод имеет охлаждающие радиаторы *3*. Между анодом и катодом приложено большое постоянное

напряжение. Вдоль оси магнетрона действует сильное постоянное магнитное поле, которое создается специальным магнитом. Магнетрон расположен между полюсами магнита (на рис. 179 магнит не показан). Полость каждого резонатора подобна витку, а щель, связывающая резонатор с центральной полостью, подобна конденсатору. При включении магнетрона в резонаторах возникают свободные колебания, причем магнитное поле в основном сосредоточено в полости резонатора, а электрическое — в щели.

Процесс возникновения колебаний происходит следующим образом. При включении источников питания в резонаторах возникают

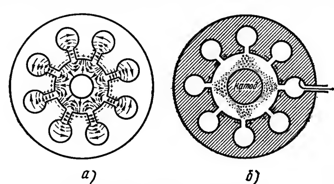


Рис. 180. Принцип действия магнетрона:
а — распределение электрических полей, *б* — образование пространственных зарядов

свободные колебания. Резонаторы связаны общей полостью, поэтому колебания, возникшие в одном из них, мгновенно возбуждают колебания во всех остальных резонаторах. Внутри каждой полости возникает переменное магнитное поле, а во внутреннем пространстве анода, окружающем катод, образуются переменные электрические поля. Распределение электрических полей для какого-то одного момента времени показано на рис. 180,*а*.

Вращающееся вокруг катода электронное «облако» взаимодействует с электрическим полем резонаторов. Одни электрические поля тормозят движение электронов, а другие, направленные противоположно, ускоряют его. Электроны группируются в пространственные заряды, напоминающие по форме спицы вращающегося колеса (рис. 180,*б*). Число «спиц» вдвое меньше числа резонаторов.

Тормозящиеся электроны отдают большую часть своей энергии электрическому полю резонаторов, этим в магнетроне поддерживаются незатухающие колебания СВЧ. Резонатор, в котором имеется виток связи с нагрузкой, связан со всеми другими резонаторами, поэтому в нагрузку передается их общая энергия.

Многорезонаторные магнетроны изготовляют на частоты 400 — 1000 МГц (длина волны 0,75 м — 3 мм). Колебательная мощность — сотни и даже тысячи киловатт. К.п.д. таких магнетронов достигает

70%. Их широко применяют в импульсных передатчиках дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) обладают следующими преимуществами перед клистронами и магнетронами: обеспечивают бо́льшее усиление в широкой полосе частот и имеют меньший уровень собственных шумов. В лампах бегущей волны также применен принцип группирования электронов.

Электронная пушка, состоящая из катода *1*, управляющего электрода *2* и анода *3*, создает сфокусированный электронный поток (рис. 181). Этот поток проходит вдоль оси спирали *5*, которая вместе с баллоном помещена в металлический цилиндр *4*. На цилиндре расположена фокусирующая катушка *6*, которая обеспечивает фокусировку электронов вдоль оси спирали.

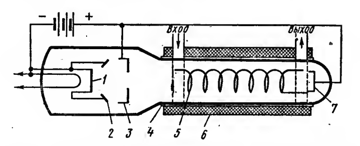


Рис. 181. Схема устройства и включения лампы бегущей волны

Коллектор *7* служит для улавливания электронов. Усиливаемый сигнал поступает с входного волновода. Начало спирали помещено во входном волноводе и играет роль приемного штырька. В спирали возникает бегущая волна. Она распространяется вдоль провода спирали, т. е. винтовой линии со скоростью, близкой к скорости света (300 000 км/с). А скорость распространения волны вдоль оси спирали меньше во столько раз, во сколько окружность витка спирали больше ее шага, т. е. расстояния между витками. Обычно спираль конструируют так, что движение волны вдоль оси происходит примерно в десять раз медленнее, чем по виткам спирали, т. е. со скоростью $v \approx 30\,000$ км/с. Таким образом, спираль является замедляющей системой.

В любой момент времени вдоль оси спирали образуются участки, тормозящие и ускоряющие движение потока электронов. Участок на протяжении одной полуволны является тормозящим, а соседний, также длиной в полуволну, — ускоряющим.

Напряжение на аноде подбирают так, чтобы скорость электронного луча, попадающего в спираль, была немного больше скорости v. Поле бегущей волны взаимодействует с электронным потоком. На участке тормозящего поля электроны группируются в сгустки. Постепенно уменьшая скорость, они отдают энергию полю, усиливая бегущую волну. Попадая на участки ускоряющего поля, они увели-

чивают свою скорость и, обгоняя его, постепенно переходят в следующий участок, где поле тормозящее, и снова отдают энергию бегущей волне. Это происходит по всей длине спирали. По мере перемещения волны к концу спирали амплитуды тока и напряжения волны увеличиваются; происходит усиление колебаний. На конце спирали имеется штырек, который возбуждает колебания в выходном волноводе.

Для очень коротких сантиметровых или миллиметровых волн замедляющие системы выполняют не в виде спирали. Это могут быть волноводы со стенками в виде гребенок или волноводы зигзагообразной конструкции.

Лампы бегущей волны могут работать на частотах 3000 МГц и выше как усилители и как генераторы колебаний СВЧ. В основном их выпускают двух типов — входные, применяемые в приемниках радиорелейных линий и радиолокационных приемниках, и выходные, используемые в передатчиках радиорелейных линий мощностью от 1 до 20 В.

Лампы обратной волны (ЛОВ) имеют много общего с лампами бегущей волны, но электронный поток взаимодействует с электромагнитной волной, распространяющейся в обратном направлении (отсюда и название — лампа обратной волны).

Электронный поток, сфокусированный электронной пушкой, движется вдоль замедляющей системы и поступает на коллектор. Возбуждаемая в лампе бегущая волна движется от коллектора к электронной пушке. Вывод энергии осуществляется со стороны электронной пушки. Лампа обратной волны может применяться как для усиления, так и для генерации колебаний СВЧ. Особенностью ее является то, что она как усилитель и генератор легко перестраивается на другую частоту только путем изменения питающего напряжения. Напряжение изменяется от нескольких сотен до нескольких тысяч вольт. Это дает возможность изменять частоту колебаний в больших пределах.

В диапазоне миллиметровых волн в качестве генераторов применяют схемы на туннельных диодах, которые могут генерировать колебания в очень широком диапазоне частот (до нескольких гигагерц). Однако мощность таких генераторов очень мала. Практически удается получить колебательную мощность лишь в единицы или доли милливатта, поэтому применение таких генераторов пока ограничено. Ведется большая работа по использованию для радиосвязи *оптического диапазона волн* (частоты порядка 10^{12} Гц). Для генерации и усиления таких частот применяют квантовые генераторы — лазеры и мазеры, принцип действия которых рассматривается в § 60.

Контрольные вопросы

1. Начертите блок-схему радиопередающего устройства и объясните назначение ее элементов.
2. Объясните особенности мягкого и жесткого режимов самовозбуждения.
3. Какие особенности имеет режим колебаний второго рода?

4. Как осуществляется умножение частоты в схеме радиопередатчика?
5. С какой целью применяют стабилизацию частоты в схемах радиопередатчиков? Какими способами ее осуществляют?
6. Что называется модуляцией колебаний? Какие виды модуляции применяют в современных радиопередатчиках?
7. Как осуществляется амплитудная модуляция? Какой состав имеют колебания, модулированные по амплитуде?
8. Как можно осуществить частотную модуляцию? Почему ее применяют на длинных и средних волнах?
9. Какие особенности имеют передатчики СВЧ?
10. Как устроен многорезонаторный магнетрон и каким образом в нем осуществляется процесс генерации колебаний?
11. Из каких элементов состоит отражательный клистрон? Как осуществляется его работа?

Глава XI
РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 52. НАЗНАЧЕНИЕ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАДИОПРИЕМНИКОВ

Радиоприемное устройство предназначено для приема, преобразования и использования энергии электромагнитных волн. В его состав входит антенна, приемник и оконечный прибор. Приемная антенна воспринимает энергию электромагнитных волн и преобразует ее в энергию токов высокой частоты. Радиоприемник осуществляет выделение сигналов нужной станции, их усиление и преобразование для приведения в действие оконечного прибора. В зависимости от назначения радиоприемника оконечным прибором может служить громкоговоритель, телеграфный аппарат, электроннолучевая трубка, счетно-решающее или электромеханическое устройство.

Каждый радиоприемник характеризуется определенными качественными показателями: чувствительностью, избирательностью, качеством воспроизведения, полосой пропускания, выходной мощностью. Так же как и для других видов аппаратуры для приемника имеет большое значение устойчивость и надежность работы, экономичность и удобство управления.

Чувствительностью радиоприемника называется его способность принимать слабые сигналы. Она оценивается минимальным входным напряжением, при котором приемник обеспечивает номинальную выходную мощность. Чувствительность современных радиотелеграфных приемников составляет десятые доли и единицы микровольт, радиотелефонных — единицы микровольт, телевизионных — десятки, сотни и тысячи микровольт. Чувствительность радиоприемников СВЧ удобно оценивать в единицах мощности; для высококачественных приемников она составляет 10^{-11} — 10^{-13} Вт.

Способность приемника выделять сигналы нужной станции называется *избирательностью*. Передающие станции работают на близких друг другу волнах. Кроме того, различные технические устройства создают помехи радиоприемнику. Чем выше избирательность приемника, тем меньше действуют на него посторонние радиостанции и другие помехи. Однако если приемник пропускает слишком узкую полосу частот, то могут возникнуть искажения, так как некоторые боковые составляющие модулированного сигнала будут ослаблены. Поэтому каждый приемник в зависимости от назначения должен иметь вполне определенную избирательность.

Чем меньше искажений вносит приемник, тем лучше качество воспроизведения принимаемого сигнала. При усилении сигналов возникают нелинейные и частотные искажения. Кроме того, искажения вносят колебательные контуры. Чем выше избирательность приемника, тем уже полоса частот, которую он пропускает, и тем более острую кривую резонанса должны иметь колебательные контуры. Но при этом боковые частоты модулированного сигнала ослабле-

ны и форма его меняется. Таким образом, требования высокой избирательности и хорошего качества воспроизведения противоречат друг другу. В § 55 будет показано, как разрешается это противоречие.

§ 53. БЛОК-СХЕМА РАДИОПРИЕМНИКА

Радиоприемники подразделяют по виду принимаемых сигналов (непрерывные и импульсные), виду модуляции (АМ, ЧМ и др.), диапазонам волн и роду работы (телефонные, телеграфные, телевизионные и др.). По особенностям схемы различают приемники прямого усиления и супергетеродинные.

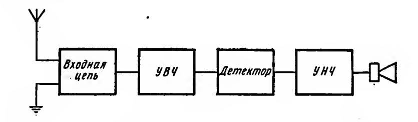


Рис. 182. Блок-схема приемника прямого усиления

Наиболее простыми являются радиоприемники прямого усиления. Обычно их применяют для приема радиотелефонных сигналов — речи или музыки. Колебания, принятые антенной, действуют на входную цепь, которая представляет собой контур или систему контуров (рис. 182). Входная цепь обеспечивает выбор сигналов нужной станции. Усилитель высокой частоты (УВЧ) содержит один или два каскада усиления на электронных лампах или транзисторах. Нагрузкой каскада служит колебательный контур.

В детекторной ступени осуществляется преобразование модулированных колебаний высокой частоты в колебания, соответствующие передаваемому сигналу. Для детектирования обычно используют полупроводниковый диод. Усилитель низкой частоты (УНЧ) состоит из одного-двух каскадов усиления колебаний низкой частоты. Оконечным прибором служит телефон или громкоговоритель.

Приемники прямого усиления имеют низкую избирательность, невысокую чувствительность и другие недостатки и в настоящее время применяются очень редко. Современные приемники, как правило, выполняют по супергетеродинной схеме.

Блок-схема супергетеродинного приемника показана на рис. 183. Усилитель высокой частоты, детектор и усилитель низкой частоты имеют то же назначение, что и в приемнике прямого усиления. Но в супергетеродинном приемнике усиление

производится не на частоте принимаемого сигнала, а на пониженной, так называемой промежуточной частоте.

Напряжение высокой частоты с контура УВЧ поступает на преобразователь, который состоит из гетеродина и смесителя. Гетеродин является маломощным генератором с самовозбуждением и вырабатывает колебания высокой частоты, отличающиеся от частоты принимаемого сигнала в радиовещательных приемниках на 465 кГц. Колебания сигнала и гетеродина одновременно действуют на смеситель. Возникает явление биений, заключающееся в том, что при сложении колебаний, немного отличающихся по частоте, амплитуда результирующего колебания периодически изменяется (рис. 184). В некоторые моменты оба колебания совпадают по фазе и складываются, а в другие моменты — противоположны по фазе и вычитаются. Частота, с которой изменяются амплитуды, равна разности частот слагаемых колебаний.

В схеме супергетеродина на смеситель подаются колебания сигнала и гетеродина. Суммарное переменное напряжение высокой частоты изменяется по амплитуде. Изменения амплитуд происходят с разностной частотой (465 кГц). Смеситель работает в нелинейном режиме. Его выходной ток имеет целый ряд переменных составляющих. Например, если частота приходящего сигнала 1000 кГц, а частота гетеродина 1465 кГц (обычно ее берут выше частоты сигнала), то ток смесителя содержит частоты 1000; 1465; 465; 2000; 2930 кГц и еще другие так называемые комбинационные частоты и гармоники. Однако контур смесителя настроен на частоту 465 кГц, и на нем выделяется напряжение только этой частоты, которая и является промежуточной частотой приемника.

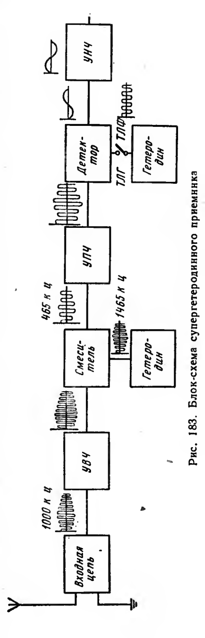


Рис. 183. Блок-схема супергетеродинного приемника

При приеме модулированного сигнала напряжение промежуточной частоты будет также модулировано, причем при преобразовании частоты форма модулирующего колебания сохраняется неизменной. Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) обычно имеет несколько каскадов усиления. Переменное напряжение с выхода УПЧ поступает на детектор.

Рис. 184. Процесс биений: *а* — первое колебание, *б* — второе колебание, *в* — результирующее колебание

Супергетеродинный приемник имеет большие преимущества перед приемником прямого усиления. Контуры УПЧ всегда настроены на одну и ту же частоту и при приеме различных станций их не нужно перестраивать. Основное усиление осуществляется на сравнительно низкой частоте и паразитные обратные связи слабее, чем в приемнике прямого усиления. Поэтому можно применить большое число каскадов УПЧ. Кроме того, на промежуточной частоте можно получить большее усиление одного каскада, чем на частоте сигнала. Большое усиление увеличивает чувствительность приемника, а большое число резонансных контуров повышает избирательность. И наконец, большое усиление сигнала дает возможность применить различные регуляторы и другие устройства, улучшающие качество работы приемника.

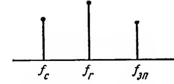


Рис. 185. Возникновение зеркальной помехи

Однако супергетеродинный приемник имеет и недостатки. Прежде всего из-за наличия большого числа ламп и других деталей, а также из-за большого усиления у него велики собственные шумы. Схема и конструкция супергетеродинного приемника сложнее, чем приемника прямого усиления. Кроме того, в супергетеродинном приемнике наблюдаются помехи особого вида. В рассмотренном выше примере частота сигнала была 1000 кГц. Частота гетеродина, которую чаще всего берут выше частоты сигнала, должна быть при этом 1465 кГц. Разность этих двух частот и составляет промежуточную частоту. Предположим теперь, что на частоте 1930 кГц работает радиостанция и напряжение этой частоты действует на преобразователь. Разность частот этой станции и гетеродина составляет 1930—1465 = 465 кГц, т. е. равна промежуточной частоте. Поэтому сигнал мешающей станции усиливается каскадами УПЧ и прослушивается на выходе.

Такие помехи называются *зеркальными* нлн *симметричными*, так как частота мешающей станции $f_{зп}$ отлнчается от частоты гетеродина $f_г$ на столько же килогерц, на сколько н частота сигнала f_c (рнс. 185). Задачу ослабления зеркальной помехн выполняют входные контуры и контуры УВЧ, которые настроены на частоту нужной станции. Избирательность супергетеродннного приемника по зеркальному каналу является одним нз важных показателей его работы. Для приемников 1-го класса прием по зеркальному каналу должен быть ослаблен не менее, чем в сотни раз (40—60 дБ).

§ 54. ВХОДНЫЕ ЦЕПИ И УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Входными цепями прнемника называют цепи, связывающие приемную антенну с первой усилительной ступенью. Назначение входных цепей заключается в том, чтобы из множества сигналов различных частот, воздействующих на прнемную антенну, выделнть полезный сигнал и передать его на усилитель высокой частоты.

Существуют различные схемы входных цепей. Одна из ннх, изображенная на рис. 186, *а*, называется схемой емкостной связи с антенной. Приемную антенну обычно не настраивают на частоту принимаемого сигнала. Чтобы цепь антенны по возможности меньше влияла на контур входной цепи, емкость конденсатора C_0 выбирают небольшой (5—50 пФ). Недостаток этой схемы— нзменение параметров антенной цепи при перестройке приемника. Емкостное сопротивление конденсатора C_0 зависит от частоты. При настройке приемника на более высокую частоту степень связи с антенной увеличивается, при настройке на более низкую — уменьшается. Поэтому схему емкостной связи с антенной обычно прнменяют лишь в радиоприемниках с фикснрованной настройкой.

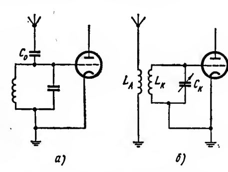


Рис. 186. Схемы входных цепей:
а — емкостная связь с антенной, *б* — индуктивная связь с антенной

В схеме индуктнвной связи с антенной (рнс. 186, *б*) связь между антенной катушкой L_A и катушкой контура $L_к$ также выбирают слабой. Схема нндуктивной связи с антенной проста и ее применяют в приемниках самых разлнчных типов.

В современных приемниках с магнитными антеннами входная цепь образует единое целое с антенной. Катушки входного контура н связи размещают на феррнтовом сердечннке, который нмеет высокую магннтную проницаемость. Магнитная антенна обладает направленнымн свойствамн. Она особенно удобна для переносных малогабаритных прнемников, но применяется н в стационарных приемннках на длинных н среднн волнах.

Усилителями высокой частоты (УВЧ) в радиоприемниках называют те каскады, в которых происходит усиление на частоте принимаемого сигнала. Эти каскады увеличивают чувствительность и избирательность приемника; их выполняют на транзисторах или электронных лампах. Нагрузкой служит колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту сигнала. Следовательно, каскады УВЧ являются *резонансными усилителями*. Для удобства настройки приемника конденсатор переменной емкости анодного колебательного контура (см. рис. 103, 104, *а*) объединяют в один блок с конденсатором входного контура.

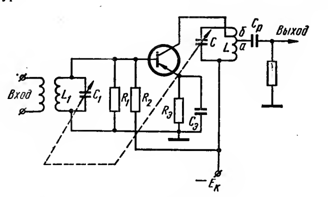


Рис. 187. Схема УВЧ

Схемы УВЧ на транзисторах имеют некоторые особенности. Каскады УВЧ обычно выполняют по схеме с общим эмиттером. Входное и выходное сопротивления этой схемы невелики и заметно шунтируют контур, ухудшая его избирательные свойства. Чтобы ослабить это явление, применяют так называемое неполное включение контура. К следующему каскаду контур подключают не концом катушки, а в точке на одном из его витков (точка *а* на рис. 187). Эквивалентное сопротивление контура при таком включении меньше и шунтирующее действие транзистора слабее. Аналогичным образом включается контур в коллекторную цепь (точка *б*).

Выбор типа транзистора или лампы для УВЧ имеет большое значение. В этих каскадах могут применяться лишь транзисторы с достаточно высокой граничной частотой и лампы с большим внутренним сопротивлением и малой проходной емкостью, например высокочастотные пентоды.

Основным показателем работы УВЧ является коэффициент усиления по напряжению. Он зависит от свойств транзистора или лампы и резонансного сопротивления контура. Для каскада на пентоде с прямым включением контура (см. рис. 103, *а*) коэффициент усиления может быть определен по формуле

$$K_{рез} = SR_э,$$

где S — крутизна характеристики лампы; $R_э$ — эквивалентное резонансное сопротивление контура.

Чем выше крутизна характеристики и больше резонансное сопротивление, тем больше коэффициент усиления. Если усилитель высокой частоты содержит несколько каскадов, то общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. С повышением частоты усилительные свойства каскада ухудшаются. Для каждой схемы каскада УВЧ существует предельная величина усиления, которое он может обеспечить в заданной полосе частот.

§ 55. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И УСИЛИТЕЛИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

Преобразователи частоты. Преобразование частоты дает возможность повысить чувствительность и избирательность приемника. Основное усиление происходит на сравнительно низкой промежуточной частоте. Выбор промежуточной частоты приемника имеет большое значение. Чем меньше промежуточная частота, тем легче получить большой коэффициент усиления каждого каскада. Кроме того, при низкой промежуточной частоте конденсатор контура УПЧ имеет большую емкость, что уменьшает влияние различных паразитных емкостей. Но при низкой промежуточной частоте увеличивается влияние зеркальной помехи, так как она находится ближе к резонансной частоте входного контура.

Промежуточная частота должна лежать в диапазоне частот, где находится наименьшее количество мощных радиостанций. Если на промежуточной частоте приемника окажется какая-либо работающая станция, то ее сигналы через различные паразитные связи могут воздействовать на вход УПЧ и будут усилены. Это создаст помехи приему.

Наименее «загруженными» являются диапазоны частот 100—120 и 400—500 кГц. Поэтому ГОСТом установлена промежуточная частота «всеволновых» радиовещательных приемников 465 ± 2 кГц. В приемниках УКВ приняты промежуточные частоты 6,75; 8,4 и 10,7 МГц.

Для преобразования частоты применяют полупроводниковые диоды, пентоды и многосеточные лампы. Диодные преобразователи не дают усиления сигнала и применяются только в приемниках СВЧ, где транзисторы и лампы оказываются непригодными. Для преобразования частоты в ламповых приемниках чаще всего используют пентоды или многосеточные лампы. Схемы преобразователей делят на односеточные и двухсеточные.

В односеточном преобразователе напряжения сигнала и гетеродина подают на одну и ту же сетку лампы. Например, на схеме, показанной на рис. 188, *а*, напряжение сигнала поступает на управляющую сетку пентода с контура УВЧ. Одновременно на ту же сетку через небольшую емкость $C_{св}$ подается напряжение от гетеродина. Цепочка автоматического смещения $R_к C_к$ обеспечивает

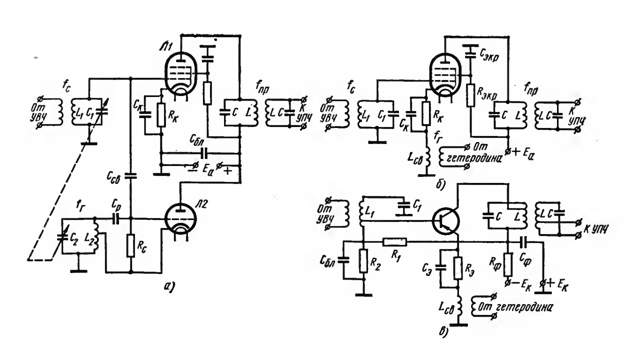


Рис. 188. Схемы односеточных преобразователей:

а — на пентоде с емкостной связью, *б* — на пентоде с катодной связью, *в* — на транзисторе с эмиттерной связью

работу лампы на нелинейном участке характеристики. В анодном токе возникает переменная составляющая промежуточной частоты, на которую настроен контур в цепи анода. На рис. 188, *а* гетеродин выполнен по схеме с автотрансформаторной обратной связью, но может быть использована и другая схема автогенератора, например с индуктивной обратной связью.

Другой вариант односеточного лампового преобразователя частоты — схема с катодной связью смесителя с гетеродином (рис. 188, *б*). Напряжение сигнала подано на управляющую сетку пентода, а напряжение гетеродина через катушку связи $L_{св}$ — на катод. Напря-

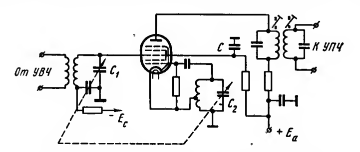


Рис. 189. Схема двухсеточного преобразователя частоты без отдельного гетеродина

жение автоматического смещения на управляющую сетку создается на резисторе $R_к$, шунтированном емкостью $C_к$. Через катушки связи $L_{св}$ и контура L_1 это напряжение подается на управляющую сетку и обеспечивает нужный режим работы лампы.

Аналогичная схема на транзисторе изображена на рис. 188,*б*. Напряжение сигнала с контура УВЧ L_1 C_1 поступает на базу транзистора, а напряжение гетеродина с катушки связи $L_{св}$ — на эмиттер. Смещение на базу транзистора обеспечивает делитель напряжения R_1 R_2, температурную стабилизацию — детали $C_э$ $R_э$. Так же как и в схемах УВЧ на транзисторах, здесь применяется неполное включение контуров.

Недостатком односеточных преобразователей является сравнительно сильная связь между контурами УВЧ и гетеродина. При изменении режима работы УВЧ частота гетеродина меняется и прием делается неустойчивым. Поэтому в радиовещательных приемниках часто применяют двухсеточные преобразователи.

На рис. 189 показана схема **двухсеточного преобразователя** на гептоде без отдельного гетеродина. Анодом гетеродина служит экранная сетка лампы преобразователя. Гетеродин собран по трехточечной схеме с автотрансформаторной обратной связью. Две точки контура подключены к катоду и первой управляющей сетке, третья точка заземлена, но по переменной составляющей оказывается подключенной к аноду гетеродина через емкость C.

Настройку приемника на частоту принимаемой станции производят блоком переменных конденсаторов, включенных в контуры

УВЧ и гетеродниа, т. е. одиовремеииым измеиеиием емкостей C_1 и C_2. С помощью подстроечиых коидеисаторов, ие показаииых иа схеме, при заводской регулировке обеспечивается постояииая разиость частот гетеродина и прииимаемой стаиции, т. е. постояииое зиачеиие промежуточиой частоты.

Усилители промежуточной частоты. Для усилення промежуточной частоты обычио примеияют полосовые усилнтели, схемы которых были показаиы на рис. 105, *а*, *б*. В каждой из схем контуры L_1 C_1 н $L_2 C_2$ иастроены иа одиу и ту же частоту, имеют одинаковые параметры н образуют полосовой фильтр. Фнльтры всех каскадов УПЧ и в цепи коллектора нли анода преобразователя частоты выполияют одинаково. Для точиой подстройки на промежуточную частоту нспользуют катушкн с перемещающимися сердечниками.

Рис. 190. Резонансная кривая полосового фильтра

Связь между коитурами обычио подбирают близкой к критической, н крнвая резоиаиса по форме близка к идеальной (рис. 190). В некоторых приемииках связь между контурами можио нзменять с целью регулировки шнрины полосы пропускания.

Процесс работы уснлителя промежуточиой частоты ие отличается от процесса работы УВЧ, ио каскад УПЧ обеспечивает большее усилеиие прн отиосительио широкой полосе пропускаиия.

§ 56. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Детектированием изывается процесс преобразования модулнрованных колебаний высокой частоты в ток нлн напряжеиие, измеияющиеся по закоиу модуляцнн. Это процесс, обратиый процессу модуляцни. Поэтому каскад приеминка, осуществляющий детектнроваиие (детектор), иногда изывают демодулятором. В качестве детектора обычио нспользуют полупроводииковый диод, лишь в иекоторых схемах применяют электроииые лампы. Днодиый детектор может примеияться для детектироваиия достаточно сильных сигиалов. Достоинством его являются малые искажеиия.

Рассмотрим работу диодиого детектора (рис. 191). С полосового фильтра УПЧ иа детекторный каскад поступает иапряжеиие промежуточиой частоты, модулнроваииое колебаннями звуковой частоты. Диод обладает выпрямнтельнымн свойствами. Ток в цепи диода протекает лишь в течеиие одного полупериода переменного напряжения. Он имеет нмпульсиую форму и, как показывают расчеты, содержит составляющие: постояииую, перемеииую промежуточиой частоты и перемеииую звуковой частоты. Нагрузкой диода служнт резистор R (0,1—0,5 МОм). На этом резнсторе создают паденне напряжения постояиная н перемеиная составляющие звуковой частоты. Для токов промежуточной частоты резнстор R зашунтнрован емкостью

C_1 (100—200 пФ). Через конденсатор C_2 (десятые или сотые доли микрофарады) переменное напряжение звуковой частоты поступает в каскады УНЧ.

Из графиков (рис. 192) видно, что при воздействии немодулированного сигнала импульсы анодного тока имеют одинаковую высоту. При этом ток в цепи диода не содержит составляющей звуковой частоты. На резисторе R выделяется только выпрямленное постоянное напряжение. На усилитель низкой частоты колебания не поступают. Таким образом, только при воздействии модулированного сигнала с детектора снимается напряжение звуковой частоты.

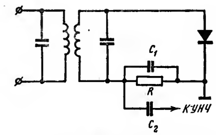


Рис. 191. Схема диодного детектора

Рис. 192. Графики физических процессов в цепи диодного детектора:
а — напряжение на контуре, *б* — ток в цепи детектора, *в* — напряжение на нагрузке

В ламповых приемниках прямого усиления применяют схемы сеточного и анодного детекторов. В схеме сеточного детектора детектирование осуществляется в цепи управляющей сетки, в схеме анодного детектора — в анодной цепи. В современных приемниках эти схемы не используют.

§ 57. ПРИЕМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Блок-схема приемника частотно-модулированных сигналов (рис. 193) отличается от схемы приемника амплитудно-модулированных сигналов (см. рис. 183) тем, что в ней имеется амплитудный ограничитель и вместо обычного амплитудного детектора применен частотный.

Под действием помех сигнал на входе приемника оказывается модулированным не только по частоте, но и по амплитуде. *Амплитудный ограничитель* служит для устранения паразитной амплитудной модуляции и подачи на частотный детектор напряжения, модулированного только по частоте. Чтобы осуществить эту задачу, в детек-

торе должна существовать определенная зависимость выходного напряжения от входного.

Эта зависимость, называемая характеристикой ограничителя, в идеальном случае выражается ломаной линией (рис. 194). Напряжение U_m, при котором характеристика становится горизонтальной,

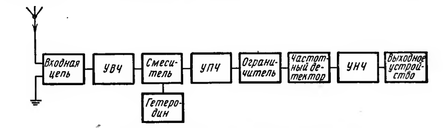


Рис. 193. Блок-схема приемника ЧМ сигналов

называется *порогом ограничения*. Обычно к входу ограничителя подводят напряжение, амплитуда которого в 2—3 раза больше порога ограничения. При этом изменения амплитуды напряжения на входе не влияют на величину выходного напряжения.

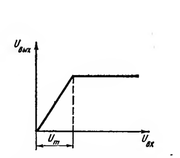


Рис. 194. Характеристика ограничителя

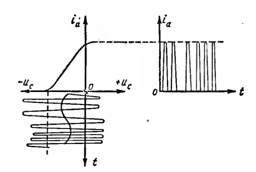


Рис. 195. Ограничение по максимуму тока

Как видно из графиков, показанных на рис. 195, напряжение на входе изменяется по частоте и амплитуде, а напряжение на выходе модулировано только по частоте. Обычно ограничитель представляет собой каскад усиления промежуточной частоты, работающий в специальном режиме.

Существуют и другие схемы ограничителей, например схема, изображенная на рис. 123, *а*.

Частотный детектор должен преобразовывать колебания, модулированные по частоте, в колебания низкой звуковой частоты. В простейшем случае в качестве частотного детектора используют каскад усиления промежуточной частоты, анодный контур которого рас-

строен относительно несущей частоты. Как видно из графика, изображенного на рис. 196, работа происходит «на скате» резонансной кривой. При изменении частоты приходящего сигнала изменяется амплитуда напряжения на контуре.

Таким образом, изменения частоты сигнала преобразуются в изменения амплитуды. Дальнейшее преобразование амплитудно-модулированного сигнала можно осуществить детектором любого типа. Так как ветви резонансной кривой нелинейны, то простейший частотный детектор вносит искажения и его применяют лишь в приемниках, качество работы которых невысокое.

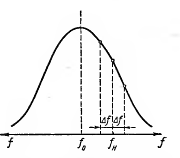


Рис. 196. График работы частотного детектора с расстроенным контуром

Большое распространение получила схема дискриминатора, показанная на рис. 197. Контур ограничителя $L_1 C_1$ и связанный с ним вторичный контур $L_2 C_2$ настроены на среднюю промежуточную частоту сигнала. На аноды первого и второго диодов подведено переменное напряжение первичного контура и половина переменного напряжения вторичного контура. Если сигнал соответствует средней промежуточной частоте, которая является и резонансной частотой контуров, то токи обоих диодов одинаковы. На резисторах R_1 и R_2 создаются одинаковые по величине выпрямленные напряжения. Напряжение на выходе равно нулю.

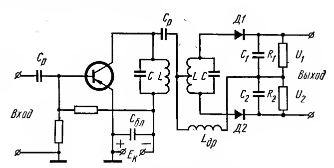


Рис. 197. Схема дискриминатора

Когда частота сигнала уменьшается, напряжение на резисторе R_1 увеличивается, а на резисторе R_2 уменьшается. На выходе появляется положительное напряжение. В те моменты, когда частота сигнала увеличивается, возрастает напряжение на резисторе R_2, а на выходе появляется отрицательное напряжение.

Таким образом, на выходе схемы возникает переменное напряжение, изменения которого соответствуют изменению частоты приходящего сигнала. Высокочастотные колебания, модулированные по

частоте, преобразуются в колебания звуковой частоты, соответствующие тому звуку, который воздействовал на микрофон передатчика. Далее, как и в приемнике амплитудно-модулированных сигналов, напряжение звуковой частоты усиливается и подается на нагрузку (например, громкоговоритель).

Большим достоинством приемников частотно-модулированных колебаний является возможность применения амплитудного ограничителя, что заметно уменьшает влияние помех. Недостаток частотной модуляции заключается в том, что передатчик излучает очень широкую полосу частот. Соответственно широкую полосу пропускания (150—200 кГц) должен иметь и приемник ЧМ.

§ 58. РЕГУЛИРОВКИ В ПРИЕМНИКАХ

Чтобы приемник хорошо работал в любых условиях, нужно иметь возможность регулировать его работу. Чаще всего необходима регулировка усиления. Близко расположенные мощные станции создают большую амплитуду напряжения на входе, сигналы маломощных отдаленных станций слабы и создают малое входное напряжение. Даже при приеме одной и той же станции напряжение сигнала может меняться, например, вследствие явления замирания. У многих приемников можно регулировать полосу пропускания, чем улучшается качество звучания. Регулировки могут быть ручными и автоматическими.

Регулировка усиления. Все радиовещательные приемники имеют *ручную регулировку усиления* (*регулятор громкости*). Однако при быстром изменении входного сигнала, например вследствие явления замирания, ручная регулировка не может обеспечить постоянный уровень сигнала на выходе приемника. Поэтому наряду с ручной широко применяется *автоматическая регулировка усиления* (АРУ).

Для осуществления АРУ в каскадах УВЧ и УПЧ ламповых приемников используют высокочастотные пентоды с удлиненной характеристикой. На управляющие сетки этих ламп подают отрицательное смещение, снимаемое с нагрузки детектора. Чем больше амплитуда сигнала, тем большее напряжение смещения подается на сетки усилительных ламп и тем меньше усиление усилительных каскадов.

Существует много различных схем АРУ. В схеме простой АРУ (рис. 198, *а*) напряжение промежуточной частоты, снимаемое с контура УПЧ, действует в цепи детектора. На сопротивлении нагрузки R, равном $R_1 + R_2$, выделяется постоянное напряжение, которое через фильтр $R_ф C_ф$ подается на сетки усилительных ламп. Фильтр служит для того, чтобы на сетки ламп не попало напряжение звуковой частоты, также выделяющееся на нагрузке детектора. Для устранения паразитных связей между каскадами через цепи АРУ в цепь каждой управляющей сетки включают развязывающий фильтр.

Недостатком простой схемы АРУ является то, что она уменьшает усиление даже при слабых сигналах. Поэтому наиболее распространенной является схема АРУ с задержкой, которая начинает дей-

ствовать только при определенном уровне сигнала (рис. 198,*б*). При слабых сигналах усиление приемника не уменьшается. Диод *Д1* служит детектором. С его нагрузочного сопротивления R_2 снимается напряжение звуковой частоты на сетку УНЧ. Диод *Д2* служит детектором АРУ.

На детектор АРУ через конденсатор C_3 (30—100 пФ) подано напряжение промежуточной частоты с контура УПЧ. Резистор R_3

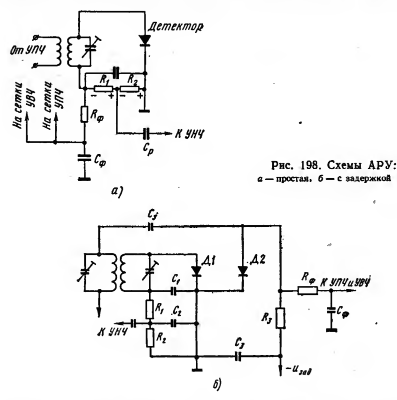


Рис. 198. Схемы АРУ:
а — простая, *б* — с задержкой

является нагрузкой детектора АРУ. С него снимается дополнительное напряжение смещения на сетки ламп УПЧ и УВЧ. Через сопротивление R_3 на детектор АРУ подается отрицательное напряжение задержки (2—3В). При отсутствии сигнала или слишком слабом сигнале детектор АРУ оказывается запертым, АРУ не действует. Только при сильных сигналах, когда напряжение, снимаемое с колебательного контура, больше напряжения задержки, в цепи детектора возникает ток и на сетки усилительных ламп подается отрицательное напряжение.

Регулировка усиления в транзисторных приемниках встречает некоторые затруднения. В принципе ее можно осуществить так же, как и в ламповых каскадах, путем изменения режима транзистора, например изменения смещения на базу. Но при этом изменяется вход-

ная и выходная проводимость транзистора, а это в свою очередь изменяет частотную и фазовую характеристики приемника, его избирательность и настройку. Поэтому в транзисторных приемниках чаще применяют другие способы регулировки усиления, например изменение отрицательной обратной связи или включение регулируемых делителей напряжения между каскадами.

На рис. 199 изображены две схемы регуляторов усиления. В схеме, показанной на рис. 199,*а*, регулятором *R* изменяется напряжение смещения на базу транзистора. В схеме, изображенной на

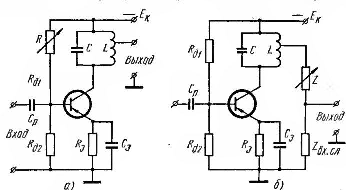


Рис. 199. Схема регулировки усиления транзисторных приемников:

а — изменением напряжения смещения, *б* — изменением дополнительного сопротивления

рис. 199,*б*, регулятором служит сопротивление *Z*, в качестве которого обычно включают управляемый полупроводниковый диод. Вместе с входным сопротивлением следующего каскада $Z_{вх\ сл}$ он образует делитель усиленного напряжения.

На этом принципе построена схема АРУ, показанная на рис. 200. Каскады УПЧ, выполненные на транзисторах *T1* и *T2*, совершенно одинаковы. При помощи резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$ на базы транзисторов подается напряжение смещения. Ячейки $R_э$ $C_э$ обеспечивают температурную стабилизацию режима транзисторов. Детали $R_ф$ $C_ф$ — образуют развязывающие фильтры в цепях питания коллекторов. Нагрузкой каждого каскада служит контур *LC*, настроенный на промежуточную частоту.

Между этими двумя каскадами включен управляемый диод *Д1*. Вместе с входным сопротивлением транзистора *T2* он образует делитель напряжения. Сопротивление управляемого диода в большой степени зависит от приложенного к нему постоянного напряжения. При изменении напряжения в пределах от +0,5 до —1 В сопротивление диода меняется в тысячи раз.

В исходном режиме, при приеме слабых сигналов, диод открыт, его сопротивление мало и большая часть напряжения сигнала, усиленного первым каскадом УПЧ, подается на вход второго каскада.

Если же на диод подать управляющее постоянное напряжение, то его сопротивление возрастет, падение напряжения на нем увеличится и на вход второго каскада УПЧ будет поступать уменьшенное напряжение сигнала.

Управляющее напряжение поступает на диод с детектора АРУ, выполненного на диоде *Д2*. Нагрузкой диода служит резистор R_8, для токов промежуточной частоты зашунтированный конденсатором

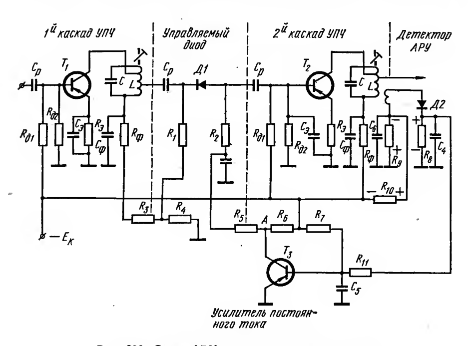


Рис. 200. Схема АРУ в транзисторном приемнике

C_2. При приеме слабых сигналов диод *Д2* заперт отрицательным напряжением задержки. Это напряжение снимается с делителя, образованного резисторами R_9 и R_{10}. На транзисторе *Т3* выполнен усилитель постоянного тока. Режим работы транзистора обеспечивают подбором резисторов R_4 и R_5.

При приеме слабых сигналов схема АРУ не работает. Если же на вход приемника поступает сильный сигнал, то напряжение на выходе второго каскада УПЧ превышает напряжение задержки и диод *Д2* открывается. На резисторе R_8 появляется постоянное напряжение; из схемы видно, что через ячейку фильтра C_5 R_{11} оно поступает на базу транзистора *Т3*. Уменьшается ток в цепи коллектора *Т3* и падение напряжения на резисторе R_6, возрастает отрицательный потенциал на коллекторе (точка *А*). Это изменение через резистор R_5 передается в цепь управляемого диода *Д1*. Сопротивление диода воз-

растает, уменьшается напряжение на входе второго каскада УПЧ и соответственно общее усиление приемника.

Регулировка полосы пропускания. Полосу пропускания приемника обычно изменяют вручную, например при помощи переключателя. При широкой полосе пропускания сигнал принимается с меньшими искажениями, но при этом в приемник проникает много помех. Широкую полосу пропускания целесообразно иметь при приеме близко расположенных мощных станций, уровень сигнала которых значительно выше уровня помех. Если же ведут прием слабых сигналов далеко расположенной станции, то лучше иметь узкую полосу пропускания: помехи значительно ослабляются.

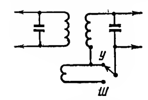


Рис. 201. Схема регулировки полосы пропускания

В супергетеродинных приемниках полоса пропускания определяется прежде всего полосой пропускания усилителя промежуточной частоты. Поэтому регулировка полосы пропускания осуществляется в каскадах УПЧ. Для этого чаще всего изменяют связь между контурами полосового фильтра, например, изменяя взаимное расположение катушек или применяя дополнительные элементы схемы.

На рис. 201 показана схема регулировки полосы пропускания при помощи дополнительной катушки. Катушка состоит из нескольких витков, связанных с первым контуром полосового фильтра сильной связью. При включении катушки (положение переключателя *Ш*) связь между контурами увеличивается, форма резонансной кривой меняется и полоса пропускания становится более широкой. Для получения узкой полосы пропускания переключатель ставят в положение *У*.

Рассмотрев элементы схемы приемника, ознакомимся с его полной принципиальной схемой.

В качестве примера рассмотрим схему радиовещательного супергетеродинного приемника на полупроводниковых триодах, изображенную на рис. 202. Приемник имеет диапазон длинных и средних волн. Переход с одного диапазона на другой осуществляется кнопочным переключателем. Напряжение сигнала с катушки L_1 или L_2 подается на базу триода *T1*. Напряжение гетеродина с катушки L'_3 или L_4' поступает в цепь эмиттера того же триода. Здесь осуществляется преобразование частоты.

Нагрузкой триода *T1* служит сложный полосовой фильтр (катушки L_5, L_6, L_7 и конденсаторы C_{13} — C_{18}). Напряжение промежуточной частоты усиливается двумя каскадами УПЧ (триоды *T2* и *T3*) и подается на детектор (диод *Д*). Напряжение низкой частоты с нагрузки детектора поступает на усилитель низкой частоты, имеющий три каскада (триоды *T4*—*T7*). Выходной каскад приемника выполнен по двухтактной схеме с трансформаторным выходом. Нагрузкой служит громкоговоритель.

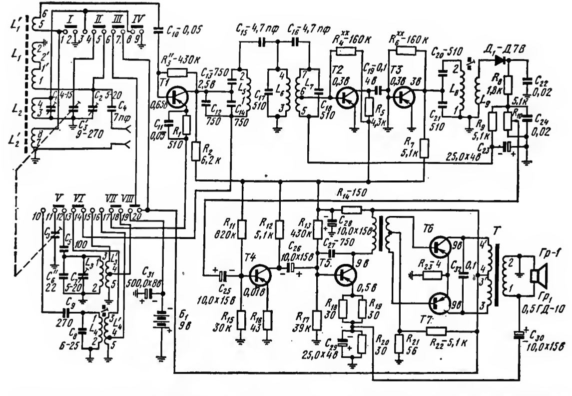


Рис. 202. Принципиальная схема радиовещательного супергетеродинного приемника на транзисторах

§ 59. ПРИЕМНИКИ ДИАПАЗОНОВ УКВ

По сравнению с приемниками длинных, средних и коротких волн приемники УКВ диапазонов имеют ряд особенностей. Применение электронных ламп, транзисторов и колебательных контуров, состоящих из катушек и конденсаторов, возможно лишь в метровом диапазоне, т. е. на частотах до 30 МГц. На более высоких частотах, которые принято называть сверхвысокими (СВЧ), для усиления и генерирования могут применяться лишь лампы с дисковыми выводами, клистроны, лампы бегущей и обратной волны, а в качестве колебательных систем — отрезки коаксиальных линий и объемные резонаторы.

Радиоприемники УКВ имеют широкую полосу пропускания, что объясняется их назначением. В метровом и дециметровом диапазонах осуществляются телевидение, радиовещание и радиосвязь с частотной модуляцией, на дециметровых и сантиметровых волнах — импульсная радиосвязь. Высококачественный прием ЧМ, телевизионных и импульсных сигналов может обеспечить только радиоприемник с широкой полосой пропускания. Например, для приема телевизионного вещания полоса пропускания приемника должна быть около 8 МГц. Широкую полосу пропускания приемник УКВ должен иметь еще и потому, что на частоту его гетеродина влияет много факторов и уход этой частоты по абсолютной величине значителен. При узкой полосе пропускания прием будет невозможен. И, наконец, на УКВ невысок уровень внешних помех. Уже в диапазоне метровых волн атмосферные и индустриальные помехи почти незаметны. Поэтому в радиоприемниках УКВ главную роль играют внутренние шумы, ограничивающие величину общего усиления и чувствительность приемника.

Эти особенности определяют как построение схем, так и конструктивное выполнение приемников УКВ. Чтобы уровень полезного сигнала значительно превышал уровень собственных шумов антенной цепи и первого каскада приемника, на УКВ выбирают сильную связь антенны с входным контуром. Если антенна соединяется с приемником фидерной линией, то очень важно согласовать линию с антенной и входом приемника. При согласовании на входе приемника получается наибольший полезный сигнал.

Приемники метровых и дециметровых волн, как правило, имеют каскады усиления на частоте принимаемого сигнала (УВЧ). На сравнительно низких частотах (до 500 МГц) в этих каскадах могут применяться электронные лампы, включенные по схеме с общей сеткой или по каскодной схеме. Так как одна ступень на очень высоких частотах дает малое усиление, то УВЧ содержит несколько ступеней. В приемниках сантиметровых волн каскады УВЧ выполняют на лампах бегущей волны. В преобразователях частоты обычно применяют схему с отдельным гетеродином, причем смесителем служит высокочастотный полупроводниковый диод.

Основное усиление сигнала осуществляется на промежуточной частоте, которая в приемниках УКВ очень высока (3—80 МГц). На

такой частоте трудно осуществить большое усиление ступени при широкой полосе пропускания. Ранее было показано, что полоса пропускания колебательного контура и его добротность связаны соотношением

$$П = \frac{f_0}{Q}.$$

Чтобы получить широкую полосу пропускания каскада, нужно иметь низкую добротность контура. Но при этом контур имеет малое резонансное сопротивление и коэффициент усиления каскада также мал. Поэтому чувствительные приемники УКВ имеют по 8— 10 каскадов усиления промежуточной частоты. Как и в приемниках более длинных волн, детектирование в приемниках УКВ осуществляется при помощи диодов.

В диапазонах дециметровых и сантиметровых волн приемники обычно имеют автоматическую подстройку частоты (АПЧ), осуществляемую следующим образом. Напряжение промежуточной частоты подается на дискриминатор, который в схемах АПЧ чаще называют различителем. Если в процессе работы изменяется частота гетеродина или принимаемого сигнала, то изменяется и промежуточная частота. При этом на выходе дискриминатора появляется напряжение, которое воздействует на схему с реактивной лампой, включенной параллельно контуру гетеродина. Выходное напряжение дискриминатора изменяет реактивное сопротивление лампы, а следовательно, частоту гетеродина. Таким образом, автоматически поддерживается почти неизменное значение промежуточной частоты и устойчивый прием сигнала.

§ 60. ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ И СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

В диапазоне длинных и средних волн сильно сказываются *атмосферные помехи* радиоприему, возникающие при различных электрических разрядах в атмосфере. Они создают трески и шорохи, затрудняющие прием. Зимой атмосферные помехи слабы, но летом сказываются сильно, а при близких грозовых разрядах могут сделать прием совсем невозможным. В приемниках, где обеспечено большое усиление сигнала (например, в супергетеродинных), влияние атмосферных помех особенно велико. С атмосферными помехами трудно бороться. Для уменьшения их влияния рекомендуется уменьшать длину антенны и высоту ее подвеса. На коротких волнах атмосферные помехи невелики, а в диапазоне УКВ они почти совсем не проявляются.

Индустриальные, или *промышленные, помехи* создаются различными электрическими установками и даже бытовыми электроприборами. Источником таких помех служат электрические искры, возникающие при включении и выключении аппаратуры, работа городского электротранспорта, автотранспорта (искры в системе зажигания) и т. д. Помехи радиоприему создают также ртутные выпрямители, высокочастотные медицинские установки,

рентгеновская аппаратура, электросварочные аппараты и многие другие устройства.

Помехи от электрических установок могут проникать в приемник как через антенну, так и другими путями. Например, электромагнитное поле помехи может воздействовать непосредственно на катушку колебательного контура или монтажные провода. Часто помехи попадают в приемник через сеть электропитания. Борьба с индустриальными помехами ведется прежде всего там, где они возникают.

В нашей стране существует обязательное для всех организаций и ведомств указание о подавлении радиопомех. Разработаны допустимые нормы, за выполнением которых следит Государственная инспекция электросвязи. Источник помех, например систему зажигания в автомашине или самолете, экранируют. Параллельно разрывным контактам электрических цепей включают искрогасители. В простейшем случае это емкость и сопротивление. Чтобы высокочастотные помехи не распространялись по проводам, в них включают специальные фильтры. Однако даже применение всех этих мер в крупных промышленных центрах может оказаться недостаточным. Поэтому радиоприемные центры обычно размещают за городом, на достаточном расстоянии от источников помех.

Современный приемник конструируют так, чтобы уменьшить влияние помех. Катушки колебательных контуров, контуры промежуточной частоты и некоторые лампы помещают в специальные экраны. Монтаж выполняют на металлическом шасси, которое заземляют. Экранируют и некоторые провода.

В настоящее время количество работающих радиостанций очень велико. Поэтому в антенне кроме сигнала нужной станции могут возникать э.д.с. от других радиостанций. Помехи такого рода называются интерференционными. Чем выше избирательность приемника, тем меньше влияют на него сигналы других радиостанций. Если мешающая радиостанция расположена близко и имеет значительную мощность, в антенную цепь можно включить специальный фильтр, настроенный на частоту этой станции. Токи мешающих сигналов при этом не попадут в приемник.

При приеме слабых сигналов особенно большое значение имеют помехи, возникающие в самом приемном устройстве, — собственные шумы. Исследования показывают, что источниками таких помех являются движущиеся электрические заряды — электроны и ионы. Электроны, имеющие наименьшую массу из всех заряженных частиц, обладают наибольшими скоростями и особенно часто являются причиной собственных шумов.

В каждом отрезке провода или резисторе имеются свободные электроны, совершающие хаотическое тепловое движение. В процессе этого движения происходят столкновения, изменяющие величину и направление скорости. Движение электрона в промежутке времени от одного столкновения до другого можно рассматривать как элементарный электрический ток, величина которого зависит от скорости движения, а длительность — от времени свободного пробега электрона.

Множество электронов создают слабые и кратковременные импульсные токи, вызывающие шум на выходе приемника. Такие помехи называются *«белым» шумом*. В реактивных элементах схемы (индуктивность, емкость) белый шум не возникает. В электровакуумных приборах с накаленным катодом возникают так называемые *дробовые шумы*. Причина их — неравномерное излучение электронов с катода. В многоэлектродных приборах дробовые шумы еще более заметны, так как электронный поток распределяется неравномерно по времени между электродами.

На сверхвысоких частотах сказывается инерция электронов. Время движения электрона внутри лампы соизмеримо с длительностью усиливаемого сигнала. Электрон, пролетая мимо сетки, наводит в ней электрический заряд. Возникают дополнительные шумы, называемые н а в е д е н н ы м и.

В результате на выходе приемника даже при отсутствии сигнала имеется напряжение, которое создается его собственными шумами. Если принимаемый сигнал слабее собственного шума приемника, то его можно выделить на фоне шумов только специальными методами. Качество работы приемника определяется отношением $\frac{\text{шум}}{\text{сигнал}}$ на выходе. Чем больше это отношение, тем легче выделить полезный сигнал. Наибольшее значение имеют собственные шумы первых каскадов приемника и, особенно, входного, так как они усиливаются всеми последующими каскадами.

В современной технике применяют новые способы усиления слабых колебаний высокой частоты — квантовые и параметрические усилители, усилители на туннельных диодах.

В к в а н т о в ы х у с и л и т е л я х отсутствует электронный поток, а следовательно, источник дробовых шумов. Квантовые приборы могут работать на каких угодно высоких частотах, так как инерционность электронов в них не играет никакой роли.

Возможность создания квантовой системы впервые обосновал советский ученый В. А. Фабрикант еще в 1939 году. В последующие годы работы целого ряда советских и зарубежных ученых позволили создать различные конструкции квантовых генераторов и усилителей. Особенно следует отметить заслуги Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, которым в 1959 году за работы в области квантовой электроники была присуждена Ленинская премия. Еще в 1951 — 1952 годах ими была обоснована возможность создания молекулярного усилителя и генератора радиоволн. В основе работы таких приборов лежит эффект так называемого индуцированного излучения, т. е. превращения внутренней энергии микрочастиц вещества (молекул, ионов, атомов) в энергию электромагнитного поля высокой частоты.

В 1954 году английский ученый Ч. Таун опубликовал сообщение о построенном им молекулярном генераторе радиоволн, который может работать и как усилитель. Его название «Мазер» образовано первыми буквами английских слов «усиление микроволн посредством индуцированного излучения». Последующие работы в этой области показали, что молекулы некоторых веществ могут излучать очень

короткие радиоволны, соответствующие диапазону видимого света. Так были получены оптические квантовые генераторы — *лазеры*, позволяющие использовать световые волны для радиосвязи и телевизионных передач. Это дает огромные возможности, так как только в диапазоне видимого света можно разместить без взаимных помех несколько миллионов телевизионных каналов.

Квантовые усилители являются сложными устройствами. Они требуют применения сильных магнитных полей и охлаждения до очень низких температур. Значительно проще могут быть выполнены параметрические усилители. Параметрическими называют электрические цепи, параметры которых могут изменяться под воздействием внешних сил. В наиболее распространенных параметрических диодных усилителях (ПДУ) изменяется емкость цепи. Чтобы рассмотреть принцип действия таких усилителей, вспомним, что энергия заряженного конденсатора и величина его заряда определяются формулами:

$$W=\frac{CU^2}{2}; \quad q=CU,$$

где W — энергия, Дж; U — напряжение, В; C — емкость, Ф; q — заряд, К.

Если, зарядив конденсатор, отключить его от внешней цепи и затем раздвинуть пластины (уменьшить емкость), то напряжение между пластинами возрастет. Предположим, что емкость уменьшилась в два раза. Так как конденсатор отключен от внешней цепи, заряд его остался неизменным. Следовательно, напряжение увеличилось также в два раза. Посмотрим, как при этом изменится величина энергии:

$$W=\frac{\frac{C}{2}(2U)^2}{2}=\frac{4CU^2}{4}=CU^2.$$

Итак, энергия конденсатора увеличилась вдвое за счет механической энергии, затраченной на перемещение пластин.

Если к электрической цепи, например к резонансному колебательному контуру, подвести слабый электрический сигнал синусоидальной формы и изменить емкость конденсатора, то можно получить усиление сигнала. При этом следует уменьшить емкость в тот момент, когда синусоидальный сигнал имеет максимум и увеличить ее, когда усиливаемый сигнал равен нулю. Итак, частота изменения емкости должна быть в два раза больше частоты усиливаемого сигнала.

В параметрических диодных усилителях вместо конденсаторов с раздвигающимися пластинами использованы полупроводниковые диоды. Емкость диода изменяется под влиянием переменного напряжения, которое вырабатывает специальный генератор (генератор «накачки»). Эти усилители имеют малый уровень собственных шумов. Белый шум отсутствует, так как сопротивление диода имеет емкостный характер. Такие усилители применяют для усиления слабых сигналов с частотами сотни мегагерц и выше. Недостатком их явля-

ется необходимость в достаточно мощном генераторе высокой частоты.

Наиболее простыми являются *усилители на туннельных диодах*, получающие все более широкое применение. Они имеют ряд достоинств. Туннельные диоды почти нечувствительны к внешним воздействиям. Германиевые диоды сохраняют свои свойства при изменении температуры от —200 до +100°С, а кремниевые — до + 300°С. Размеры и масса туннельных диодов очень малы, они просты в изготовлении и могут применяться для усиления сигналов как низких, так и высоких частот, включая диапазон СВЧ. Разработаны схемы на туннельных диодах для частот 10^9 — 10^{10} Гц. Для питания схемы на туннельных диодах нужны маломощные источники (расход энергии порядка милливатт). Выходная мощность диода составляет микроватты.

Затруднения встречаются при конструировании многокаскадных схем. Схемы усилителей на туннельных диодах, так же как и параметрических усилителей, не имеют четкого разделения между входом и выходом. Для разделения входа и выхода требуются специальные устройства (ответвители, мостовые схемы).

Новые типы усилителей применяют в самых различных областях радиотехники. Они позволяют увеличить дальность действия радиолокационных станций, повысить надежность радиорелейной связи, увеличить скорость работы электронных вычислительных машин.

Контрольные вопросы

1. Какими качественными показателями характеризуется работа радиоприемника?
2. В чем состоит основное отличие супергетеродинного приемника от приемника прямого усиления?
3. Какие достоинства имеет супергетеродинный приемник?
4. Как происходит преобразование частоты в супергетеродинном приемнике?
5. В чем состоит основное отличие схемы усилителя промежуточной частоты от схемы усилителя высокой частоты в супергетеродинном приемнике?
6. Какое назначение имеет детектор в схеме радиоприемника? Как происходит процесс детектирования?
7. Как осуществляется детектирование ЧМ колебаний?
8. Какие особенности имеют приемники УКВ?
9. По каким причинам возникают помехи радиоприему? Какое значение имеют собственные шумы приемника?

Глава XII
ОСНОВЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

§ 61. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При выполнении научных исследований и технических расчетов, решении задач планирования народного хозяйства и управления производством необходимо производить много сложных вычислений. Объем вычислений непрерывно растет, расчеты усложняются и практически их можно выполнить только путем применения быстродействующих устройств — электронно-вычислительных машин (ЭВМ). ЭВМ может заменить труд десятков тысяч квалифицированных вычислителей, учесть множество факторов, влияющих на конечный результат и, что особенно важно, выполнить работу в предельно короткий срок.

Классификация ЭВМ

По принципу выполнения вычислительных операций ЭВМ делят на два класса: аналоговые машины (непрерывного действия) и цифровые (дискретного действия).

Аналоговые машины выполняют математические операции над непрерывно изменяющимися величинами. Каждая такая величина является эквивалентом или аналогом физической величины реального устройства. Например, аналогично с изменением скорости управляемого объекта (ракеты, самолета) в соответствующей электрической цепи машины может меняться напряжение. Аналоговые машины широко используют для моделирования работы как существующих, так и проектируемых устройств, поэтому их иногда называют *моделирующими*. При помощи этих машин можно осуществлять управление движением различных объектов, работой станков, автоматических линий, приборов управления стрельбой и многих других устройств.

На вход машины от управляемого объекта поступает нужная информация, перерабатываемая в машине. Конечный результат вычислений получается очень быстро, практически мгновенно. С выходов машины на управляющие устройства подаются соответствующие «команды», и этим поддерживается заданный режим контролируемого объекта.

При проектировании новых конструкций нет необходимости строить действующую модель. При помощи математического аппарата можно выразить процесс проектируемого устройства, например описать системой дифференциальных уравнений процесс движения самолета. Затем посредством аналоговой машины можно решить эти уравнения, задавая разные параметры, что, например, может соответствовать разным метеорологическим условиям. Это даст представление о том, как будет вести себя проектируемое устройство в различных режимах работы.

Аналоговые ЭВМ просты по конструкции, относительно дешевы, легко комбинируются с контролирующими устройствами. Их недостаток — узкая специализация. Каждая аналоговая машина может решать лишь определенные математические задачи, например только системы алгебраических уравнений или дифференциальные уравнения. Кроме того, эти машины дают ограниченную точность вычислений (до 3—4 знаков).

В отличие от величин, изменяющихся непрерывно, плавно, существуют величины, которые могут изменяться лишь прерывисто, скачками; их называют дискретными и выражают цифрами.

Цифровые машины универсальны, т. е. могут решать разнообразные математические задачи. Кроме того, они дают высокую точность вычислений, благодаря чему цифровая вычислительная техника развивается особенно быстро.

Электронные цифровые машины стали сейчас основным вычислительным средством. Особенно широко применяют универсальные цифровые машины с программным управлением, пригодные для решения самых различных задач. Программу работы составляют заранее и вводят в машину, которая автоматически производит вычисления и выдает результат.

Учеными и инженерами нашей страны разработано много различных типов ЭВМ. Еще в 1951 году в Институте математики АН СССР была создана МЭСМ (малая электронно-счетная машина), а в 1963 году появилась БЭСМ (большая электронно-счетная машина). В дальнейшем были выпущены целые семейства ЭВМ: БЭСМ, «УРАЛ», «Минск», «Наири» и др.

Наиболее важными показателями работы ЭВМ являются ее быстродействие и объем «памяти». Современные машины способны осуществлять до 1—1,5 млн. операций в секунду и содержать в оперативной памяти до 2,5 млн. восьмиразрядных чисел. В перспективном плане развития народного хозяйства XXIV съездом предусмотрено объединение АСУ предприятий, министерств и ведомств в Общегосударственную автоматизированную систему управления (ОГАС). Для этого необходимо унифицировать выпуск вычислительных машин, т. е. выпускать ЭВМ единой системы, которые были бы совместимы и могли работать по однотипным программам.

Специалистами нашей страны и социалистических стран — членов СЭВ разработана единая система электронно-вычислительных машин (ЕС ЭВМ), состоящая из семи типов машин, выполненных на интегральных схемах. Две машины этой системы (ЕС 1010 и ЕС 1020) были выпущены в 1972 году, остальные — в последующие годы. В зависимости от типа машины единой системы имеют различное быстродействие и разный объем памяти. Для этих машин разработано около 80 типов устройств ввода и вывода. В соответствии с потребностями заказчика можно выбрать нужный тип машины, укомплектованной наиболее удобным внешним устройством. Единая система ЭВМ обеспечивает высокую степень стандартизации технических средств, возможность развития и расширения вычислительных комплексов без переделки их системы, большую экономическую эффективность.

Построение цифровых машин

Каждая электронная цифровая машина содержит:
устройство ввода исходных данных и программы;
арифметическое устройство, выполняющее вычисления;
запоминающее устройство, где хранятся исходные данные, табличные материалы, результаты промежуточных вычислений и т. п.;

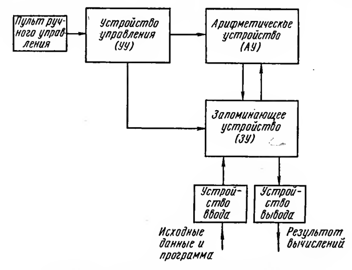


Рис. 203. Упрощенная структурная схема ЭВЦМ

устройство управления, обеспечивающее последовательность выполнения операций в соответствии с заданной программой;
устройство вывода результатов;
различные вспомогательные устройства.

На рис. 203 приведена упрощенная структурная схема ЭВЦМ, где показаны лишь основные блоки машины. Исходные данные и программа, закодированные цифрами, поступают на устройство ввода, где преобразуются в электрические сигналы. Эти сигналы подаются на запоминающее устройство (ЗУ), состоящее из отдельных ячеек. Каждая ячейка предназначена для хранения одного числа или команды.

При помощи сигналов, полученных от устройства управления (УУ), из запоминающего устройства извлекаются нужные команды и поступают в арифметическое устройство (АУ), которое в соответствии с полученной командой выполняет определенную операцию. Результат этой операции в виде электрических сигналов вновь поступает в запоминающее устройство. Если это не промежуточный, а окончательный результат, то он передается в устройство вывода. Это устройство выдает результаты вычислений, преобразуя электрические импульсы в колонки цифр на бумажной ленте или ряд от-

верстий на перфоленте или перфокарте. Важнейшими элементами всех перечисленных устройств являются регистры, триггеры, логические элементы.

§ 62. СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

Системой счисления называется способ записи чисел при помощи цифр. Различают позиционные и непозиционные системы счисления. В позиционной системе значение каждой цифры, входящей в запись числа, зависит от ее положения (позиции) в ряду цифр, изображающих число. Наиболее распространенная десятичная система счисления является позиционной. Изменение позиции цифры на один разряд вправо или влево изменяет ее значение в 10 раз. Например, в числе 6851 цифра 5 означает 50, но та же цифра в числе 6581 означает 500. Число 10 определяет структуру десятичной системы и называется ее *основанием*. Примером непозиционной системы может служить запись числа римскими цифрами. Например, в числе XXX каждая цифра X означает 10.

С развитием вычислительной техники получили распространение и другие системы счисления — двоичная (с основанием 2) и восьмеричная (с основанием 8).

Двоичная система счисления имеет только две цифры — 0 и 1 — и любое число записывается в виде комбинации нулей и единиц. Эта система также является позиционной. Например, в числе 11 в двоичной системе счисления единица, стоящая справа, означает действительно единицу. Единица, стоящая слева, находится в следующем разряде, что в двоичной системе означает увеличение в два раза. Следовательно, число 11 в двоичной системе счисления составляет $2 + 1$ и равно 3 в десятичной системе. Соответственно число 111 составляет $4 + 2 + 1$ и равно 7.

Двоичная система оказалась наиболее удобной для электрических схем. Для изображения двух цифр достаточны лишь два значения потенциала на входе или выходе схемы. Наличие импульса (высокий потенциал) обычно соответствует единице, а отсутствие импульса (низкий потенциал) — нулю.

Совершенно очевидно, что для изображения десяти цифр потребовались бы электрические схемы с десятью устойчивыми положениями, т. е. такие, которые могут иметь на выходе десять различных уровней сигнала. Такие схемы слишком сложны.

Недостатком двоичной системы является то, что для написания числа требуется большое количество цифр. Например, число 20 десятичной системы записывается 10 100 в двоичной системе. Поэтому при подготовке программы ЭЦВМ в качестве вспомогательной системы применяется также восьмеричная система счисления. Запись числа в восьмеричной системе в три раза короче, чем в двоичной, а перевод числа из двоичной системы в восьмеричную осуществляется сравнительно просто.

В восьмеричной системе для записи чисел используют восемь цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7. Число 8 изображается двумя цифрами

(10). Рассмотрим несколько примеров, помия, что перемещение цифры на один разряд влево увеличивает ее значение в 8 раз. Число 22 в восьмеричиой системе соответствует числу 18 в десятичиой ($2 \times 8 + 2$), число 100 в восьмеричной системе соответствует числу 64 в десятичиой ($8 \times 8 + 0 + 0$).

Даиные вводят в ЭЦВМ в десятичиой системе, а вычислеиия, как правило, производят в двоичиой системе. Поэтому в качестве переходиой примеияется *двоично-десятичная система счисления*. В этой системе каждая десятичная цифра заменяется четырьмя двоичными цифрами, изываемыми тетрадами.

0 — 0000	5 — 0101
1 — 0001	6 — 0110
2 — 0010	7 — 0111
3 — 0011	8 — 1000
4 — 0100	9 — 1001

Например, десятичиое число 915 в двоичио-десятичной системе имеет вид 100 100 010 101.

Арифметические действия над числами в двоичной системе

Одим из достоинств двоичиой системы является простота выполнения арифметических действий.

Сложение производят по следующим правилам:

$$0 + 0 = 0; \quad 1 + 0 = 1; \quad 0 + 1 = 1; \quad 1 + 1 = 10$$

Пример:

В десятичной системе: В двоичиой системе:

$$+\begin{array}{r} 11 \\ 16 \\ \hline 27 \end{array} \qquad +\begin{array}{r} 1011 \\ 10000 \\ \hline 11011 \end{array}$$

При *вычитаиии* руководствуются правилами:

$$0 - 0 = 0; \quad 1 - 0 = 1; \quad 1 - 1 = 0; \quad 10 - 1 = 1$$

Пример:

В десятичной системе: В двоичиой системе:

$$-\begin{array}{r} 22 \\ 12 \\ \hline 10 \end{array} \qquad -\begin{array}{r} 10110 \\ 1100 \\ \hline 1010 \end{array}$$

Умножеиие производят по следующим правилам:

$$0 \times 0 = 0; \quad 0 \times 1 = 0; \quad 1 \times 0 = 0; \quad 1 \times 1 = 1$$

Как и в десятичной системе множимое умножается на каждый разряд миожителя и полученные промежуточные произведения складываются.

Пример:

В десятичной системе:

```
×  18
   13
 ----
   54
  18
 ----
  234
```

В двоичной системе:

```
×   10010
     1101
 --------
    10010
  10010
 10010
 --------
 11101010
```

Д е л е н и е чисел в двоичной системе производят по тем же правилам, что и в десятичной. Если делимое равно или больше делителя, в частное переносится единица, если меньше — нуль.

Пример:

В десятичной системе:

$60 : 5 = 12$

В двоичной системе:

```
_111100 | 101
 101    |-----
 ----   | 1100
_ 101
  101
  ---
  000
```

Представление отрицательных чисел в машинах

Для представления в ЭВМ отрицательных чисел руководствуются некоторыми правилами и пользуются специальными кодами. Прежде всего условились обозначать нулем положительный знак числа и единицей — отрицательный. Кроме того, при вычислениях используют комплементные числа. *Комплементным* называют число, цифры которого в каждом разряде являются дополнением до девяти. Например, для числа 1675 комплементным будет число 8324 ($9999 - 1675 = 8324$), а 1675 есть арифметическое дополнение числа 8324.

Отрицательные числа представляют в ЭВМ при помощи прямого, дополнительного или обратного кода.

В п р я м о м к о д е отрицательное число записывают обычным образом, но знак минус кодируют единицей в специальном знаковом разряде.

В д о п о л н и т е л ь н о м к о д е отрицательное число заменяют его алгебраической суммой с другим числом, состоящим из нулей во всех разрядах, кроме высшего, выходящего за пределы разрядной сетки. *Разрядной сеткой* называется определенное число ячеек (разрядов) запоминающего устройства или регистра арифметического устройства.

Рассмотрим дополнительный код на примере. Предположим, имеется отрицательное число 5677, а разрядная сетка машины содержит девять разрядов. Получим алгебраическую сумму заданного отрицательного числа и единицы с девятью нулями:

$$\begin{array}{r} 1\,000\,000\,000 \\ -\quad 5\,677 \\ \hline 999\,994\,323 \end{array}$$

→ Разрядная сетка машины ←

Число 999 994 323 и будет дополнительным кодом отрицательного числа 5677. Дополнительный код лежит в пределах разрядной сетки машины и совпадает с арифметическим дополнением числа. В этом коде вычитание заменяется сложением с кодом числа.

Например:

$$\begin{array}{r} 000\,001\,832 \\ 999\,994\,323 \\ \hline 999\,996\,155 \end{array}$$

Обратный код отрицательного числа — это число, на единицу меньшее его дополнительного кода, поэтому обратный код иногда называют *неполным дополнительным кодом*. Чтобы получить обратный код числа, нужно в каждом разряде из основания системы счисления вычесть единицу и соответствующую цифру заданного числа. Знак «минус» в обратном коде заменяется единицей.

Рассмотрим обратный код на примере десятичной системы счисления. Пусть имеется отрицательное число 5677 и разрядная сетка машины, содержащая девять разрядов. В каждом разряде фиксируем цифру 9, т. е. число, на единицу меньшее основания системы счисления. Вычитаем из полученного числа заданное:

$$\begin{array}{r} 999\,999\,999 \\ -5\,677 \\ \hline 999\,994\,322 \end{array}$$

Число 999 994 322 будет обратным кодом заданного отрицательного числа 5677. Сравнивая его с дополнительным кодом, можно убедиться, что они отличаются на единицу в низшем разряде. Поэтому вычитание в обратном коде заменяется сложением с этим кодом и единицей в низшем разряде.

Например:

$$\begin{array}{r} 000\,001\,832 \\ + \\ 999\,994\,322 \\ \hline 999\,996\,154 \\ +\quad 1 \\ \hline 999\,996\,155 \end{array}$$

Дополнительный и обратный коды автоматически вырабатываются арифметическим устройством ЭВМ, причем в двоичной системе счи-

слении это получается наиболее просто. Чтобы получить дополнительный код отрицательного числа в двоичной системе, нужно заменить единицы на нули, а нули на единицы вплоть до самого младшего значащего разряда (инвертировать число). Например, для отрицательного числа 10 110 дополнительный код будет 1,01001, где единица, стоящая слева, означает знак минус.

Формы представления чисел в машинах

В вычислительной технике имеет большое значение форма, в которой записана дробная часть числа. В ЭЦВМ числа представляют в форме с фиксированной запятой или с «плавающей» запятой.

В форме с фиксированной запятой, или естественной форме, числа сохраняют обычный вид. Разрядная сетка ЭВМ для таких чисел имеет определенное число разрядов для целой и дробной частей числа. Например, в разрядной сетке на десять цифровых знаков разряды могут быть распределены, как показано в табл. 2.

Таблица 2

Разрядная сетка

	Знак	Целая часть числа					Дробная часть числа			
Разряд . .	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Нулевой разряд отведен для знака числа (положительный или отрицательный), следующие пять разрядов — для целой части и последние четыре — для дробной части.

Машина с таким запоминающим устройством может фиксировать в десятичной системе любые числа от $\pm$ 99 999, 9999 до $\pm$ 0,0001. Число, не укладывающееся в эти пределы, для ввода в ЭВМ нужно преобразовать. Кроме того, в процессе вычислений может получиться результат, выходящий за пределы разрядной сетки, что нарушит правильность вычислений. Поэтому более совершенные ЭВМ рассчитаны на запись чисел в форме с плавающей запятой, называемой *полулогарифмической* или *нормальной*.

В этой форме число представляют в виде произведения правильной дроби (мантиссы) на соответствующую степень основания системы. Например, число 125 записывают как $0{,}125 \cdot 10^3$, число 15,68 как $0{,}1568 \cdot 10^2$ и т. д. При этом ноль целых и запятая в ЭВМ не фиксируются, а лишь подразумеваются. Форма чисел с плавающей запятой позволяет разместить в машине значительно больший диапазон чисел, но ЭВМ такого типа получаются сложнее.

Сложение и умножение чисел в машинах

Современные ЭВМ способны производить расчеты очень больших объемов и сложные действия над числами (возведение в степень, извлечение корня и т. п.). Однако все эти операции чаще всего сводятся

к выполнению четырех действий арифметики, причем в основу закладывается операция сложения. Как мы уже видели, в дополнительном и обратном кодах сложение заменяют вычитанием. Умножение также может быть сведено к последовательному поразрядному суммированию, а деление — к последовательному вычитанию, заменяемому сложением с дополнительным или обратным кодом вычитаемого.

Последовательность операций при арифметических действиях зависит от формы представления чисел. В форме с фиксированной запятой действия производят по тем же правилам, что и над обычными числами. Если же числа записаны в форме с плавающей запятой, то при сложении сначала уравнивают порядок слагаемых, а затем складывают мантиссы.

Например, нужно найти сумму чисел 65 300 и 7550.

1. Представим слагаемые в нормальной форме, т. е. в виде мантиссы и порядка:

$$65\,300 = 0{,}653 \cdot 10^5$$

$$7\,550 = 0{,}755 \cdot 10^4$$

2. Уравняем порядок слагаемых, приведя меньшее число к порядку большего:

$$0{,}755 = 0{,}0755 \cdot 10^5$$

3. Сложим числа:

$$0{,}653 \cdot 10^5 + 0{,}0755 \cdot 10^5 = 0{,}7285 \cdot 10^5 = 72850$$

Подобным же образом производится и вычитание чисел.

Для умножения чисел в нормальной форме нужно перемножить мантиссы и сложить порядки чисел.

Например, найдем произведение 4800 × 0,0052.

1. Представляем сомножители в нормальной форме:

$$4800 = 0{,}48 \cdot 10^4; \quad 0{,}0052 = 0{,}52 \cdot 10^{-2}$$

2. Перемножаем мантиссы:

$$0{,}48 \cdot 0{,}52 = 0{,}2496$$

3. Складываем порядки:

$$4 + (-2) = 2$$

4. Записываем результат:

$$4800 \times 0{,}0052 = 0{,}2496 \cdot 10^2 = 24{,}96$$

Арифметические действия над числами, представленными в других системах счисления, производят по аналогичным правилам.

§ 63. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Логика — наука о формах и законах мышления — существует очень давно. Но лишь в конце прошлого века были разработаны основные положения *математической логики*, т. е. науки о применении математических методов для решения логических задач.

Основными логическими операциями являются: «НЕ» (логическое отрицание); «И» (логическое умножение); «ИЛИ» (логическое сложение). Элементы, выполняющие эти операции, называются *логическими*. Любую сложную логическую схему можно составить, комбинируя элементы «НЕ», «И», «ИЛИ». Эти элементы выполняют на электронных лампах, полупроводниковых приборах, устройствах с ферритовыми сердечниками или твердых схемах.

Логический элемент типа «НЕ» (схема отрицания)

Принцип работы такого элемента можно уяснить при помощи простейшей электрической схемы (рис. 204). В этой схеме возможны два состояния: ключ *К* замкнут, лампочка горит; ключ разомкнут,

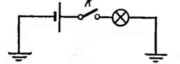


Рис. 204. Схема, поясняющая работу элемента типа «НЕ»

Рис. 205. Условное обозначение логического элемента типа «НЕ»

лампочка не горит. Эти два состояния в математической логике соответствуют так называемым истинному и ложному высказыванию. Истинное высказывание (да) считают соответствующим единице, ложное (нет) — нулю.

Логический элемент типа «НЕ» называется *схемой отрицания или инвертором*. Операцию отрицания обозначают знаком — (читают «НЕ»). Условное обозначение логического элемента типа «НЕ» приведено на рис. 205. Эта схема имеет один вход *А* и один выход *Р*. Сигнал на выходе появляется лишь в том случае, если нет сигнала на входе. Если же на вход схемы сигнал поступает, то на выходе сигнала нет. Кроме того, схема меняет полярность сигнала.

Рассмотрим диодно-трансформаторную схему типа «НЕ» (рис. 206). При отсутствии на входе сигнала на выходе действует положительное напряжение, примерно равное напряжению источника *E*. Входной импульсный сигнал положительной полярности подается на первичную обмотку импульсного трансформатора *Тр*. Вторичная обмотка включается таким образом, чтобы при этом на выходе возникал импульс отрицательной полярности, уравновешивающий напряжение *E*. Следовательно, при воздействии положительного входного импульса напряжение на выходе уменьшается до нуля.

Вариант схемы «НЕ» на транзисторе показан на рис. 207. При отсутствии входного сигнала транзистор заперт небольшим положительным напряжением E_0, поданным на базу относительно эмитте-

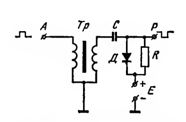


Рис. 206. Диодно-трансформаторная схема типа «НЕ»

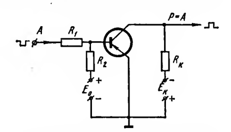


Рис. 207. Схема типа «НЕ» на транзисторе

ра. При воздействии на вход схемы отрицательного импульса транзистор отпирается и на выходе возникает импульс положительного напряжения.

Логический элемент типа «И» (схема совпадения)

Для уяснения принципа работы этого элемента рассмотрим электрическую схему, показанную на рис. 208. Как и в схеме, изображенной на рис. 204, в ней возможны два состояния, но лампочка горит

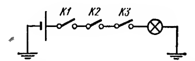


Рис. 208. Схема, поясняющая принцип работы элемента типа «И»

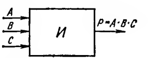


Рис. 209. Схематическое обозначение логического элемента типа «И»

только при всех замкнутых выключателях. Логический элемент типа «И» выполняет операцию логического умножения. Условное обозначение этого элемента приведено на рис. 209. Схема совпадения имеет несколько входов (A, B, C) и один выход P. Сигнал на выходе появляется лишь в случае, если будут сигналы на всех входах схемы. Если нет сигнала хотя бы на одном из входов, на выходе сигнала не будет.

Рассмотрим принцип действия схемы типа «И» на полупроводниковых диодах. Такая схема называется диодно-реостатной (рис. 210). Если на все входы поданы положительные импульсы напряжения, по амплитуде несколько большие, чем напряжение источника питания E, то все диоды заперты, тока в цепи нет и на выходе схемы имеется полное напряжение E (высокий потенциал). Если же на одном из

входов, например на входе A, напряжение сигнала отсутствует, то через этот диод протекает ток и на сопротивлении R возникает напряжение.

Это сопротивление выбирают значительно большим любого из выходных сопротивлений ($R \gg R_1$; $R \gg R_2$ и т. д.). Поэтому большая часть напряжения источника будет падать на сопротивлении R, а напряжение на выходе будет близко к нулю (низкий потенциал). Для работы с отрицательными входными импульсами нужно изменить полярность включения диодов.

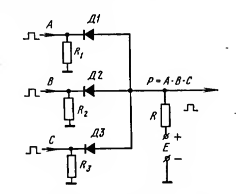


Рис. 210. Диодно-реостатная схема типа «И»

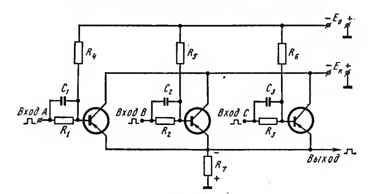


Рис. 211. Схема типа «И» на транзисторах

Диодно-реостатная схема совпадения имеет малое входное сопротивление (R_1; R_2 и т. д.), т. е. сильно нагружает источники сигналов. Выходное сопротивление ее велико (приблизительно равно R), а амплитуда выходного сигнала мала. Поэтому на практике ее чаще выполняют на триодах, пентодах или транзисторах.

На рис. 211 показана схема типа «И» на транзисторах. При отсутствии сигнала все транзисторы отперты, в цепи коллектора каждого транзистора протекает ток, на резисторе R_7 создается падение напря-

жения. На выходе схемы возникает отрицательный потенциал.

Если на все входы одновременно подать положительный импульс напряжения, то транзисторы будут заперты, напряжение на резисторе R_7 окажется близким к нулю, а потенциал на выходе схемы возрастет от первоначального отрицательного значения до нуля. Это соответствует положительному выходному импульсу. Если сигнал подается только на один вход, то потенциал на выходе схемы изменяется мало, выходной импульс отсутствует.

Логический элемент типа «ИЛИ» (собирательная схема)

Как и в предыдущих случаях, рассмотрим несложную электрическую цепь, в которой лампочка включается при замыкании любого из выключателей *К1*, *К2* или *К3* (рис. 212). Логический элемент типа «ИЛИ» воспроизводит операцию логического сложения. Условное обозначение этой схемы приведено на рис. 213. Схема имеет несколько входов (*А*, *В*, *С*) и один выход *Р*. Сигнал на выходе появляется, если есть сигнал на одном или нескольких входах (т. е. «ИЛИ» на первом, «ИЛИ» на втором, «ИЛИ» на нескольких).

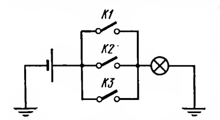


Рис. 212. Схема, поясняющая принцип работы элемента типа «ИЛИ»

Рассмотрим диодно-реостатную схему типа «ИЛИ» (рис. 214). При отсутствии входных сигналов на выходе сигнал отсутствует. Если на одном из входов, например на входе *А*, появляется положительный импульс напряжения, то диод *Д1* открывается и на выходе по-

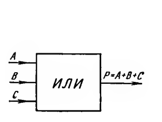


Рис. 213. Условное обозначение логического элемента типа «ИЛИ»

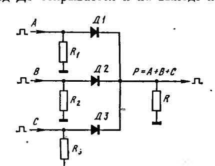


Рис. 214. Диодно-реостатная схема типа «ИЛИ»

является также положительный импульс напряжения. Так как сопротивление диода в прямом направлении мало, то выходной импульс имеет амплитуду, примерно равную амплитуде входного. Если импульсы поступают одновременно на несколько входов, то выходной

импульс имеет амплитуду, равную амплитуде наибольшего импульса. Диоды *Д1*, *Д2*, и *Д3* служат для развязки между собой источников входных импульсов. Импульс с входа *A*, например, не может попасть к входу *B*, так как для него диод *Д2* оказывается включенным в обратном направлении.

Диодно-реостатная схема «ИЛИ», так же как и схема «И», дает сравнительно небольшое напряжение на выходе. Поэтому чаще при-

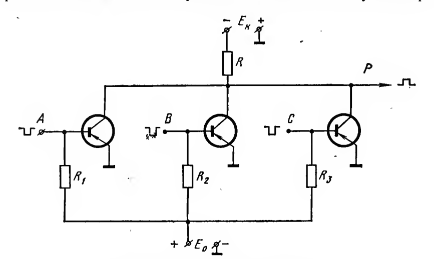


Рис. 215. Схема типа «ИЛИ» на транзисторах

меняют схемы на электронных лампах и транзисторах. Схема типа «ИЛИ» на транзисторах показана на рис. 215. При отсутствии входных импульсов транзисторы заперты небольшим положительным напряжением E_0, поданным на базы. Отрицательный импульс, поступающий на один из входов, отпирает транзистор, в цепи этого транзистора возникает ток, а на выходе появляется отрицательный импульс напряжения.

Магнитные логические элементы

В магнитных логических элементах главным образом используется одна группа магнитных материалов — ферриты. Ферритами называют окислы металлов. В ЭВМ применяют магний-марганцевые ферриты $MgO \cdot MnO \cdot Fe_2O_3$ (в весовом соотношении 52 : 7 : 41). Из ферритов изготовляют сердечники обычно тороидальной формы с внешним диаметром 7—10 мм и меньше. На сердечнике располагают обмотку, по которой пропускают ток.

Магнитные свойства ферритов оказались чрезвычайно удобными для их применения в ЭВМ. Во-первых, эти материалы способны очень быстро перемагничиваться (приблизительно за 1 мкс). Во-вторых, они имеют почти прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 216). Петлей

гистерезиса называется замкнутая кривая, характеризующая зависимость магнитной индукции B от напряженности внешнего магнитного поля H. Другими словами, эта кривая показывает, как происходит намагничивание и перемагничивание материала.

Предположим, что по обмотке сердечника протекает постоянный ток и она создает магнитное поле с напряженностью H_m. При этом магнитная индукция в сердечнике равна B_m (точка A кривой). Если уменьшить ток в обмотке, то будет уменьшаться и напряженность

Рис. 216. Гистерезисная кривая феррита

Рис. 217. Схема феррит-диодной ячейки

магнитного поля H. Из графика видно, что магнитная индукция B при этом почти не меняется. Магнитное состояние сердечника устойчиво, он остается намагниченным даже тогда, когда ток в обмотке, а следовательно, и напряженность магнитного поля равны нулю (точка D). Остаточная магнитная индукция характеризуется отрезком OD.

Чтобы размагнитить сердечник, нужно создать отрицательную напряженность магнитного поля, пропустив в обмотке ток обратного направления. Если напряженность поля будет достаточно велика ($-H_m$), сердечник быстро перемагнитится. Магнитная индукция достигнет значения $-B_m$ (точка M кривой). Это новое магнитное состояние сердечника также устойчиво. При изменении напряженности поля в больших пределах магнитная индукция почти не меняется, сердечник остается намагниченным.

Таким образом, сердечник, выполненный из материала с прямоугольной петлей гистерезиса, может находиться в одном из устойчивых магнитных состояний. Чтобы перевести его в другое устойчивое состояние, нужно создать внешнее магнитное поле с достаточной напряженностью, т. е. пропустить по обмотке постоянный ток достаточной силы.

Магнитные сердечники применяются в ЭВМ как самостоятельно, так и в сочетании с полупроводниковыми диодами и транзисторами, образуя феррит-диодные и феррит-транзисторные ячейки.

На рис. 217 изображена схема феррит-диодной ячейки с четырьмя обмотками на сердечнике. Обмотки A и B являются входными, об-

мотка P — выходной. Обмотка C служит для подачи синхронизирующих (тактовых) импульсов. Эта схема может выполнять функции логического элемента «ИЛИ». Для этого обмотки A и B должны быть включены в одном направлении и токи в них должны быть достаточны для того, чтобы каждый входной импульс мог перемагнитить сердечник.

Если на один или оба входа поданы импульсы тока, то с приходом тактового импульса появится импульс тока и в выходной обмотке P. Если же импульсы на обоих входах отсутствуют, то тактовый импульс тока не сможет перемагнитить сердечник и в выходной обмотке тока не будет.

Эта же схема может выполнять логическую операцию «И». Для этого нужно подобрать амплитуды выходных импульсов и число витков в обмотках так, чтобы сердечник перемагничивался только при одновременном воздействии всех входных импульсов.

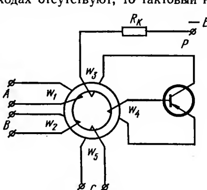


Рис. 218. Схема феррит-транзисторной ячейки

В качестве примера ферриттранзисторной ячейки рассмотрим схему, показанную на рис. 218. На ферритовом сердечнике расположено несколько обмоток, две их них (w_1 и w_2) служат входными (входы A и B). В общем случае число входных обмоток может быть и больше. Третья обмотка, включенная в цепь коллектора, является выходной (выход P). Четвертая обмотка включается в цепь базы транзистора, а пятая служит для подачи так называемых считывающих импульсов.

В исходном положении магнитное состояние сердечника соответствует остаточной магнитной индукции, например отрицательной (рис. 216, точка F на кривой). При этом в сердечнике хранится код нуля. Транзистор находится в запертом состоянии, в его коллекторной цепи протекает ничтожно малый ток. Далее на один из входов поступает импульс тока, перемагничивающий сердечник до максимальной положительной индукции (точка A). По окончании входного импульса магнитная индукция несколько уменьшается до значения положительной остаточной индукции (точка D).

В этом состоянии, соответствующем коду единицы, схема находится до появления импульса тока в обмотке считывания w_5 (рис 218). Ампер-витки этой обмотки подобраны так, что магнитное состояние сердечника почти не изменяется, лишь несколько уменьшается магнитная индукция. Но при этом в обмотке w_4 возникает э. д. с. такого направления, что на базу транзистора подается минус и транзистор открывается. Коллекторный ток, во-первых, создает выходной импульс тока и, во-вторых, перемагничивает сердечник, возвращая его в исходное состояние.

При помощи такой схемы с одним входом можно осуществить операцию «НЕ», с несколькими входами — операцию «ИЛИ». Магнитные логические элементы просты, дешевы и имеют высокую надежность; их широко используют в ЭВМ.

Регистры

Регистром называют запоминающее устройство на одно число. Рассмотрим схему регистра, предназначенного для запоминания трехразрядного двоичного числа, которое вводится в схему и выдается в виде параллельного кода. Такая схема называется *регистром параллельного действия.*

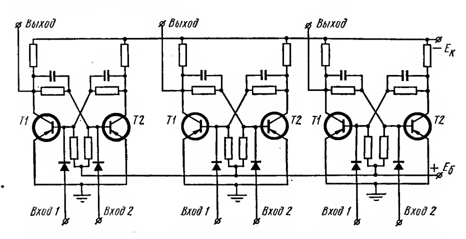


Рис. 219. Схема регистра параллельного действия на статических триггерах

В рассматриваемом случае она состоит из трех статических триггеров, собранных на транзисторах (рис. 219). Статическим называется триггер с двумя устойчивыми состояниями. Все три триггера совершенно одинаковы. Каждый из них может находиться в одном из двух устойчивых состояний. Одно состояние характеризуется высоким потенциалом на коллекторе *T1*, другое — высоким потенциалом коллектора *T2*. Соответственно одно состояние отвечает коду единицы, другое — коду нуля.

Исходное состояние всех триггеров соответствует коду 0. При этом транзисторы *T2* заперты, *T1* открыты, потенциал коллекторов *T1* низок и соответствует коду «0» и на выходе регистра. (Питание транзисторов осуществляется от источников постоянного тока $E_к$ и $E_б$.)

Входные управляющие импульсы подаются на вход *2* каждого триггера. Входной импульс соответствует коду числа, которое нужно записать на регистре. Предположим, требуется записать число 101 в двоичной системе (что соответствует числу 5 в десятичной системе). Для этого на первый и третий триггеры нужно подать входные

отрицательные импульсы, открывающие транзисторы *T2* и запирающие транзисторы *T1*. Это будет соответствовать высокому потенциалу коллекторов *T1* и коду 1 на выходах первого и третьего триггеров. На вход второго триггера не нужно подавать импульс напряжения, так как его состояние соответствует коду 0. Таким образом, первый триггер «запомнит» число 1, второй — 0, третий — 1, а весь регистр — требуемое число 101.

В указанном состоянии все три триггера будут находиться до тех пор, пока на их входы *1* не будут поданы импульсы сброса, возвращающие триггеры в исходное состояние, соответствующее коду 0. Записанное число будет «стерто», а регистр готов для новой записи.

В арифметических устройствах широко применяют *сдвигающие регистры*. Они необходимы в тех случаях, когда при умножении, делении или других действиях нужно сдвинуть число в регистре вправо или влево на один или несколько разрядов. Рассмотрим схему сдвигающего регистра на три разряда, выполненную на статических триггерах (рис. 220). Все три триггера, составляющие регистр, одинаковы и соединены между собой последовательно. Выход первого триггера (коллектор триода T_1) через линию задержки соединен со вторым триггером, выход второго — с третьим.

Линия задержки представляет собой электрическую цепь, содержащую индуктивность (емкость) и активное сопротивление. Постоянная времени этой цепи подобрана так, чтобы импульс с предыдущего триггера поступал на последующий с некоторым запаздыванием по времени, в течение которого в последующем триггере прекратятся переходные процессы.

Предположим, что в рассматриваемой схеме хранится код числа 111 и это число нужно сдвинуть на один разряд вправо. Для этого на входы всех триггеров, подключенные к одной общей шине, подаются импульсы, называемые сдвигающими. Первый импульс переводит все триггеры в положение, соответствующее коду 0. При этом на выходе каждого триггера возникает положительный импульс. Этот импульс переводит последующий триггер в состояние, соответствующее коду 1.

Таким образом, после первого сдвигающего импульса состояние первого триггера будет соответствовать коду 0, а второго и третьего — коду 1, т. е. во всем регистре будет зафиксировано число 011. На выходе регистра третий триггер создаст импульс, соответствующий коду 1.

После второго сдвигающего импульса состояние регистра будет соответствовать коду 001, а на выходе его возникнет еще один импульс, соответствующий коду 1. После третьего сдвигающего импульса состояние триггеров регистра будет отвечать коду 000, а на выходе регистра появится еще один импульс кода 1. В итоге же три выходных импульса создадут код числа 111, которое хранилось в регистре и передается в следующий низший разряд.

Схема сдвигающего регистра на феррит-диодных ячейках приведена на рис. 221. Каждое звено схемы содержит ферритовый сердечник с тремя обмотками w_1, w_2, и w_3, диод, конденсатор и резис-

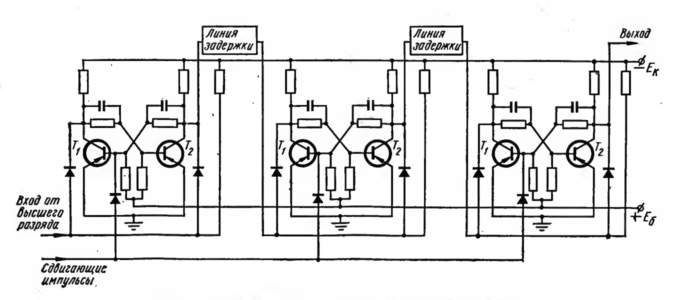


Рис. 220. Схема сдвигающего регистра на статических триггерах

тор. Предположим, что в начальный момент магнитное состояние сердечника *Ф1* соответствует коду 1, а сердечника *Ф2* — коду 0. В обмотку w_3 подается импульс тока, называемый сдвигающим. Сердечник *Ф1* перемагничивается, т. е. приводится в состояние, соответствующее коду 0. При этом в его выходной обмотке w_2 индуктируется э. д. с. и конденсатор C_1 заряжается через диод *Д1*. Так как сопротивление R_1 велико, в обмотку следующего сердечника *Ф2* ток заряда почти не ответвляется.

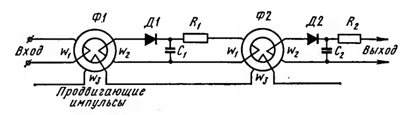


Рис. 221. Схема сдвигающего регистра на феррит-диодных ячейках

Заряд конденсатора заканчивается после прекращения сдвигающего импульса. Начинается разряд конденсатора. Ток разряда протекает через резистор R_1 и обмотку w_2 второго сердечника. Сердечник *Ф2* перемагничивается, т. е. переводится в состояние, соответствующее цифре 1. Таким образом, цифра 1 переместилась из сердечника *Ф1* в сердечник *Ф2*, т. е. на один разряд вправо.

§ 64. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Запоминающие устройства (ЗУ) предназначены для хранения исходных данных заданной программы, результатов промежуточных вычислений, часто встречающихся постоянных величин, например табличных значений различных функций. ЗУ должно иметь достаточно большую емкость и высокую скорость приема и выдачи чисел. Так как это трудно осуществить в одном устройстве, то в большинстве ЭЦВМ имеется внешнее ЗУ и внутреннее (оперативное) ЗУ.

Внешнее ЗУ не участвует в вычислительном процессе. Его данные вводят в машину по мере надобности. Во внешнем ЗУ используют перфокарты, перфоленты, магнитные ленты и магнитные барабаны. Во внутреннем оперативном ЗУ (ОЗУ) также используют запись на магнитной ленте или магнитном барабане, но чаще применяют схемы с ферромагнитными сердечниками.

Перфокарта представляет собой лист тонкого картона, разбитый на колонки и строки. Числа на перфокарте записываются в двоичной системе, единице соответствует отверстие, нулю — отсутствие отверстия. Колоду перфокарт, на которых в виде двоичных чисел записана программа работы, закладывают в машину. Машина поочередно пропускает все карты и прощупывает отверстия контактными щетками. При наличии отверстия в данном месте карты замыкается

электрическая цепь и возникает электрический сигнал, соответствующий цифре 1.

Перфоленту изготовляют из плотной бумаги или целлулоида. Числа на ленте также изображаются системами отверстий и считываются при помощи контактных щеток.

Значительно большую скорость считывания с перфокарты или перфоленты можно получить при помощи фотодиодов. С одной стороны карты или ленты помещают источник света, дающий узкий пучок, с другой стороны располагают фотодиоды. При движении карты или ленты через отверстие на фотодиод попадает свет и в его цепи возникает электрический импульс.

Записывающие устройства используют запись на магнитной ленте. Принцип записи на магнитную ленту состоит в том, что при помощи магнитной головки некоторые участки ленты намагничиваются до максимальной магнитной индукции в положительном направлении, другие — до максимальной индукции в отрицательном направлении. Эти два состояния соответствуют кодам 1 и 0. Таким образом, можно выразить любое число в двоичной системе.

Запись на магнитную ленту широко практикуют в ЭВЦМ. В ЗУ последовательного действия, где числа записываются и считываются последовательно, одно за другим, используют узкую магнитную ленту, на которой располагают 2—3 дорожки записи. В ЗУ параллельного действия все разряды одного числа записываются одновременно на широкие магнитные ленты.

Если запись производится на магнитном барабане, то на боковую поверхность алюминиевого цилиндра наносят тонкий слой лака, содержащий мельчайшие частицы ферромагнитного порошка — окиси железа. Барабан вращается, проходя под магнитными головками. Выполнить запись на магнитном барабане можно разными способами. В ЗУ параллельного действия каждая магнитная дорожка отводится для записи цифр одного разряда. Запоминаемое число составляется из цифр разных разрядов, расположенных на одной образующей барабана. При последовательной записи числа располагают друг за другом на одной дорожке. Практикуют и более сложные системы записи, например последовательно-параллельную. Внутренние ЗУ в машинах выпусков прошлых лет выполнены на магнитных сердечниках. В настоящее время внутренние ЗУ выполняют в виде матриц.

ЗУ на магнитных сердечниках имеют большой срок службы, требуют малое количество энергии при записи и считывании, имеют малые размеры и могут обеспечить высокое быстродействие. Из магнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса составляют различные типы оперативных запоминающих устройств, содержащих сотни тысяч сердечников. Расположение сердечников и схемы их соединения в устройстве имеют большое значение.

На рис. 222 показан принцип устройства ЗУ матричного типа. Сердечники, составляющие ферритовую матрицу, располагаются рядами и образуют плоскую прямоугольную систему. Через каждый сердечник пропущено три провода, образующих на сердечнике три одновитковые обмотки.

Провода X и Y называются координатными или адресными шинами. Они служат входными обмотками. При помощи этих проводов выбирается нужный сердечник при записи или считывании. Третья обмотка, называемая обмоткой считывания, пронизывает все сердечники и является выходной.

Перед началом записи все сердечники находятся в состоянии, соответствующем коду 0. Когда в машину вводится программа, на некоторые сердечники нужно записать код, соответствующий 1, т. е. перемагнитить их. Для этого по проводам X и Y, которые проходят через выбранный сердечник, одновременно подаются импульсы тока I_X и I_Y, и сердечник перемагничивается. Те сердечники, на которые поступает только ток I_X или I_Y, не перемагничиваются.

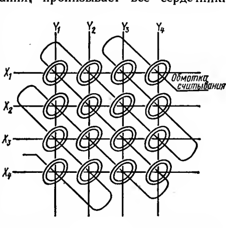


Рис. 222. Ферритовая матрица оперативного запоминающего устройства

Для считывания информации по проводам X и Y подаются импульсы тока противоположной полярности. Если в сердечнике был записан код 1, то сердечник перемагничивается и в выходной обмотке возникает э. д. с. Сердечники, состояние которых соответствовало коду 0, э.д.с. в выходной обмотке не дают.

§ 65. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

На арифметическое устройство (АУ) поступают с устройства ввода числа, выраженные в принятой системе счисления и соответствующим образом закодированные. АУ предназначено для арифметических и логических операций над этими числами. Арифметические операции выполняют сумматоры, устройства умножения и деления. Логические операции обеспечивают логические элементы. Кроме того, в состав АУ входят регистры, необходимые для приема чисел, хранения их и выдачи результатов в другие блоки, например блок управления операциями.

Сумматором называется устройство, в котором происходит операция сложения. Числа в сумматоре складываются поразрядно и при необходимости результат переносится в старший разряд. Рассмотрим работу простейшего сумматора ОС-2, предназначенного для суммирования двух одноразрядных двоичных чисел. Такой сумматор имеет два входа A и B и два выхода S и C (рис. 223). На входы подаются суммируемые числа в виде электрических импульсов различных потенциалов. Высокий потенциал (наличие импульса) соответствует коду 1, низкий потенциал (отсутствие импульса) — коду 0.

Сигнал на выходе S появляется тогда, когда есть сигнал только на одном из входов. Сигнал же на выходе C появляется только в том случае, если есть сигналы на обоих входах и необходимо перенести полученную сумму в следующий разряд.

Возможные комбинации работы сумматора ОС-2 можно представить в виде табл. 3.

Таблица 3

Вход A	Вход B	Выход S	Выход C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Первая строка соответствует случаю, когда на обоих входах, а следовательно, на обоих выходах нет сигналов. Во второй и третьей строках рассмотрены случаи, когда есть сигнал только на одном из входов и суммарный сигнал на выходе S равен единице. В четвертом случае есть сигналы на обоих входах и сумма сигналов на выходе больше единицы, что в двоичной системе соответствует переносу числа в старший разряд. В этом случае на выходе C появляется сигнал переноса.

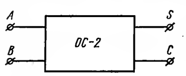


Рис. 223. Блок-схема простейшего сумматора ОС-2

Сумматор ОС-2 может быть выполнен из нескольких логических элементов на электронных лампах, полупроводниковых приборах, или феррит-диодных и феррит-транзисторных ячейках. В качестве примера рассмотрим схему сумматора ОС-2 на феррит-транзисторных ячейках (рис. 224). На ферритовом сердечнике каждой ячейки расположены одна или две входные обмотки w_1 и w_2, обмотки запрета w_3, и считывания w_4, выходная обмотка w_5. Обмотка w_6 включена в цепь базы транзистора.

Исходное состояние всех сердечников соответствует коду 0. Выходных сигналов при этом нет.

Если на вход A поступает сигнал кода *1*, то во входных обмотках сердечников *1* и *2* протекает ток и эти сердечники перемагничиваются. Одновременно входной сигнал попадает на обмотку запрета сердечника *3*. Ее ампер-витки подобраны так, что входной сигнал не может перемагнитить сердечник и он остается в исходном состоянии.

Считывающий импульс, поданный в обмотку w_4, возвращает сердечники *1* и *2* в исходное состояние. При этом в их выходных обмотках возникнут импульсы, соответствующие коду 1. С выхода сердечника *2* импульс тока поступает на входную обмотку сердечника *5* и перемагничивает его. Очередной считывающий импульс возвращает сердеч-

ник 5 в исходное состояние. При этом на выходе S сумматора появится сигнал кода 1. С выхода сердечников 1 и 2 сигналы поступают в сердечник 4. Действуя одновременно на две обмотки (w_1 и w_3), сигналы взаимно компенсируются и сердечник 4 остается в исходном состоянии. На выходе C сигнала нет, что соответствует коду нуля.

Если сигнал кода 1 подается на вход B, то он попадает на входную обмотку сердечника 3 и обмотку запрета сердечника 2. Перемагни-

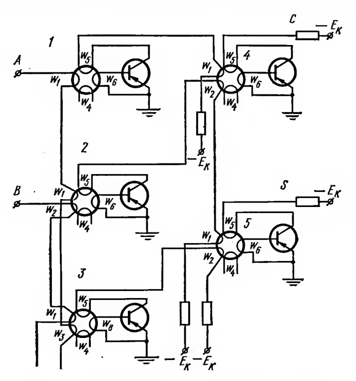


Рис. 224. Принципиальная схема простейшего сумматора на феррит-транзисторных ячейках

чивается только сердечник 3. Считывающий импульс возвращает его в исходное состояние. При этом на выходе сердечника 3 появляется сигнал 1, который перемагничивает сердечник 5. Следующий считывающий импульс возвращает сердечник 5 в состояние 0, и на выходе S появляется сигнал кода 1.

При одновременной подаче сигналов на входы A и B перемагничивается сердечник 1. Сердечники 2 и 3 остаются в исходном состоянии, так как входные сигналы в их обмотках взаимно компенсируются.

Считывающий импульс возвращает сердечник 1 в исходное состояние. При этом в выходной обмотке w_5 сердечника 1 возникает сигнал кода 1, который перемагничивает сердечник 4.

Следующий считывающий импульс перебрасывает сердечник 4 в состояние 0. При этом возникает сигнал кода единицы на выходе *C*.

Одноразрядный сумматор ОС-3 предназначен для сложения трех одноразрядных двоичных чисел. Он отличается от сумматора ОС-2 наличием третьего входа. Комбинационные сумматоры для многоразрядных чисел получаются путем сочетания одноразрядных сумматоров.

§ 66. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Устройство управления (УУ) координирует работу всех других устройств ЭВМ при помощи управляющих сигналов. Это обеспечивает последовательное автоматическое выполнение заданной программы. Программа и исходные данные в виде условных чисел — команд хра-

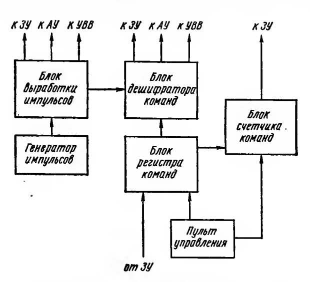


Рис. 225. Блок-схема устройства управления одноадресной машины

нятся в запоминающем устройстве машины. Управляющее устройство выбирает из ЗУ нужные команды и преобразует их в серии управляющих сигналов. На это требуется некоторое время, длительность которого определяет цикл работы УУ. Обычно этот цикл равен общему циклу работы машины.

В состав УУ входят блоки счетчика команд, регистра команд, дешифратора, выработки управляющих сигналов и другие узлы. Для уяснения их взаимодействия рассмотрим упрощенную блок-схему УУ одноадресной машины (рис. 225). Команда в таких машинах состоит только из двух частей. Первая часть указывает код операции, например сложение, вторая — номер ячейки (адрес) числа, которое нужно сло-

жить с числом уже имеющимся в сумматоре арифметического устройства. Рассмотрим назначение элементов приведенной блок-схемы.

Блок регистра команд принимает от ЗУ код команды и хранит его в течение цикла работы машины. С этого блока код операции передается на блок дешифратора команд. Кроме того, в каждом такте единичный импульс поступает на блок счетчика команд.

Блок дешифратора команд преобразует код операции в управляющий сигнал. *Дешифратор* — это избирательная схема, обеспечивающая сигнал на одном из выходов только при определенной комбинации сигналов на входах. Дешифраторы составляют из феррит-диодных или феррит-транзисторных ячеек. С блока дешифратора управляющие сигналы поступают на ЗУ, АУ и устройства ввода и вывода.

Блок счетчика команд обеспечивает определенную последовательность их исполнения. Основу его составляет счетчик, подсчитывающий номера команд, циклов и т. д. В качестве счетной ячейки обычно используется статический триггер.

Блок выработки импульсов представляет собой распределитель импульсов, поступающих с кварцевого импульсного генератора. С этого блока серии импульсов в определенной последовательности поступают на ЗУ, АУ и устройства ввода и вывода.

Пульт управления служит для ручного управления машиной и наблюдения за ее работой при помощи системы индикаторов. С этого пульта осуществляют включение и выключение машины, изменение режима ее работы, ввод дополнительной информации и многие другие операции. Некоторые ЭВМ имеют 2—3 пульта управления.

§ 67. УСТРОЙСТВА ВВОДА И ВЫВОДА

Устройство ввода служит для преобразования входных величин в электрические сигналы, которыми представлены числа в машине. Его выполняют в соответствии с элементами внешнего запоминающего устройства.

Если программа и исходные данные записаны на перфокартах или перфоленте, то устройство ввода состоит из следующих элементов:

клавишное устройство, при помощи которого программа решения задачи и исходные данные преобразуются в двоичную и двоично-десятичную системы и соответствующие электрические сигналы;

входной перфоратор, принимающий сигналы от клавишного устройства и в соответствии с ними пробивающий отверстия на карте или ленте;

контрольно-считывающее устройство, осуществляющее систематический контроль за правильностью перфорации;

считывающее устройство, где считывается информация с карты или ленты и передается в оперативно-запоминающее устройство. Считывание осуществляют при помощи фотодиодов.

Устройство вывода предназначено для вывода результатов вычислений из машины. Они могут быть записаны на перфокартах или пер-

фолентах, для чего в выходном устройстве машины имеется перфоратор, аналогичный входному. В некоторых типах машин результаты вычислений печатаются на бумажной ленте в виде колонок цифр. В этом случае выходное устройство машины автоматически переводит числа из одной системы счисления в другую и печатает в десятичной системе.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются аналоговые ЭВМ от дискретных? К которой из этих групп принадлежат цифровые ЭВМ?
2. Какие устройства входят в состав современных ЭВМ?
3. Какие особенности имеют логические элементы типа «И», «ИЛИ» и «НЕ»?
4. Что называется регистром? В чем состоит принцип работы сдвигающего регистра?
5. Какие типы запоминающих устройств применяются в ЭВМ?
6. Каково назначение арифметического устройства?
7. Чем отличается двоичная система счисления от десятичной? Почему в ЭВМ сигнал кодируется в двоичной системе?

Глава XIII
РАДИОЛОКАЦИЯ

§ 68. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Обиаружеиие различных объектов и определение их местоположения с помощью радиоволн изывается *радиолокацией*. Радиолокация осиована иа явлеиии отражеиия радиоволн от облучаемых объектов, обиаружеиием А. С. Поповым еще в 1897 году. Радиолокация развивалась очень быстро и в настоящее время стала отраслью науки и техиики, чрезвычайио важиой для иародиого хозяйства и обороиы страиы.

Наиболее широко применяют радиолокацию во флоте и в авиации. Радиолокациоиные устаиовки делают безопасиым движеиие судов при любой погоде и в любое время суток, при любой видимости. При этом исключается возможиость столкновений судов друг с другом и с различными подвижиыми и иеподвижиыми объектами, обеспечивается безопасиость движеиия в узких проливах, при входе в порт, при подходе к берегу. Примеиеиие радиолокациоииых устаиовок иа аэродромах делает безопасиой посадку самолета при любых условиях.

Радиолокацию успешно используют для исследования мирового простраиства. Радиолокация Веиеры, Марса, Юпитера (дальиость до 600 мли. км) позволила получить точиые даиные об их расстояиии до земли, структуре поверхиости, скорости вращеиия вокруг своей оси. Существует миого различных типов радиолокациоиных стаиций (РЛС).

Виды радиолокации и режимы работы РЛС. Радиолокация может быть активиой и пассивиой.

А к т и в и а я р а д и о л о к а ц и я осиоваиа иа облучении объекта электромагиитной энергией радиоволн и приеме волн, отражеииых от объекта. Этот метод наиболее распростраиен; им пользуются для обиаружения вражеских объектов и во миогих других случаях. Другой метод осиоваи на приеме переизлучеииого (ретраислироваииого) объектом сигиала. Сигиал, послаииый передатчиком РЛС, приимается на объекте, усиливается и ретраислируется специальиой аппаратурой. Этот метод примеияется для радиолокации своих объектов, обладающих плохими отражающими свойствами, иапример искусствениых спутииков Земли, метеорологических радиозондов и т. д. Им пользуются также для опознавания своих объектов. На запрос наземной РЛС объект, например самолет, автоматически посылает определенным образом закодироваииый ответ «я свой». Такими же ответиыми

устройствами оборудуются радиолокационные маяки, применяемые для морской и воздушной навигации.

Пассивная радиолокация основана на приеме радиоволн, излучаемых объектом. По этому принципу осуществляется радиопеленгация самолетов или кораблей, имеющих радиопередатчики, а также работа радиотелескопов, улавливающих излучение небесных тел.

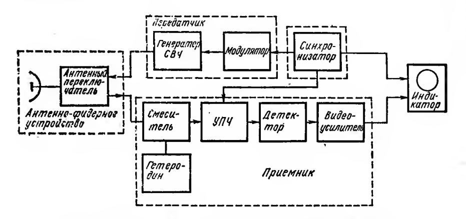


Рис. 226. Блок-схема импульсной радиолокационной станции

Рассмотрим принципы активной радиолокации. По роду излучаемого сигнала РЛС делятся на станции непрерывного излучения и импульсные.

Станция непрерывного излучения вырабатывает колебания высокой частоты, которые излучаются передающей антенной в окружающее пространство. Отраженный от объекта сигнал поступает в приемную антенну и «сравнивается» с переданным сигналом по частоте или фазе. При частотном методе определения расстояния до объекта частота колебаний, генерируемых передатчиком, изменяется, например, по пилообразному закону. Отраженный сигнал запаздывает по времени, а следовательно, отличается по частоте от посланного сигнала. При фазовом методе учитывается разность фаз высокочастотных колебаний посланного и отраженного сигналов.

В импульсных станциях передатчик излучает кратковременные высокочастотные импульсы (дискретное излучение). В паузах между импульсами передатчик выключен и на приемник действует импульсный отраженный сигнал. Импульсный способ применяется чаще.

Рассмотрим блок-схему простейшей импульсной радиолокационной станции (рис. 226). Генератор СВЧ вырабатывает кратковременные импульсы высокой частоты (радиоимпульсы), которые усиливаются и подаются в антенну. Антенна излучает электромагнитную энергию в окружающее пространство. В радиолокации применяют остронаправ-

ленные антенны. Электромагнитная энергия радиоволн распространяется в определенном направлении острым пучком или лучом. Если на пути радиоволн имеется какое-либо препятствие, то волны отражаются от него. Часть энергии отраженных волн попадает в антенну станции.

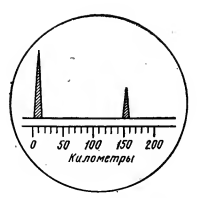


Рис. 227. Изображение импульсов на экране индикатора дальности

Так как отраженные импульсы очень слабы, их нужно усилить. Усиление проще осуществить на более низкой частоте. Поэтому в большинстве случаев радиоимпульсы преобразуют по частоте, усиливают и после детектирования подают на вход видеоусилителя, выход видеоусилителя соединен с индикатором. На экране электроннолучевой трубки индикатора возникает изображение отраженных импульсов.

Рассмотренный процесс повторяется периодически в строгой последовательности. Работу всех элементов станции согласуют по времени. Для этого служит синхронизатор, который вырабатывает пусковые импульсы. В соответствии с этими импульсами работает передатчик, включается приемник, осуществляется периодическое переключение антенны с передачи на прием, и обратно.

Индикаторное устройство простейшей станции, предназначенной для определения расстояния до объекта, представляет собой электроннолучевую трубку, на экране которой имеются масштабные деления. Электронный луч трубки передвигается слева направо с определенной скоростью и вычерчивает на экране горизонтальную линию. Масштабные деления на этой линии могут показывать единицы времени или для удобства отсчета непосредственно километры.

Как видно из блок-схемы станции (см. рис. 226), колебания СВЧ с генератора поступают через антенный переключатель в антенну. При этом небольшая часть мощности «просачивается» в приемник и поступает на индикатор. На экране индикатора создается неподвижное изображение передаваемого импульса (рис. 227). Принятый отраженный сигнал поступает на индикатор позднее и его изображение получается на экране правее изображения передаваемого импульса. Чем больше расстояние до объекта, тем позднее приходит отраженный сигнал и тем больше расстояние между импульсами на экране. Деления шкалы позволяют непосредственно определить расстояние до объекта.

Радиолокационные станции могут работать в различных режимах. В режиме п о и с к а радиолуч непрерывно перемещается в пространстве, отыскивая объект наблюдения. Это достигается поворотом антенны или перемещением в пространстве диаграммы направленности антенны. Когда объект найден, за ним устанавливается непрерывное наблюдение — с л е ж е н и е. Если объект перемещается в простран-

стве, то перемещается и луч радиолокационной станции; в режиме сопровождения непрерывно и с большой точностью измеряются координаты цели.

Управление диаграммой направленности в современных РЛС осуществляется при помощи вычислительной машины. Обнаружив объект

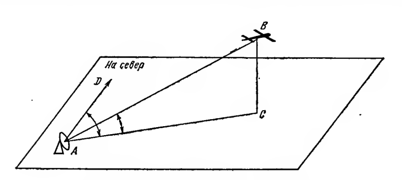


Рис. 228. Координаты объекта в пространстве

и оценив его важность, машина практически мгновенно выдает команду на перемещение в пространстве направления максимального излучения антенны.

Поиск, слежение и автоматическое сопровождение цели осуществляется группой станций. В режиме поиска работают РЛС с большой дальностью действия. Они обнаруживают цели, затем передают их другим РЛС с меньшей дальностью, которые следят за перемещением цели, получая траекторию ее движения.

Координаты, определяющие положение объекта. Для точного определения положения наблюдаемого объекта в пространстве нужно знать:

расстояние от станции до объекта;

азимут, или пеленг, т. е. угол в горизонтальной плоскости, величину которого отсчитывают от направления на север;

угол места, т. е. угол, который отсчитывают вверх от горизонтальной плоскости.

На рис. 228 показано расположение радиолокационной антенны и наблюдаемого объекта. Антенна находится в пункте A, объект наблюдения — в пункте B, расстояние до которого равно отрезку AB. Обьект наблюдения проектируется на земную поверхность в точке C. Угол BAC — угол места. Угол, образованный отрезком AC и направлением на север (прямая AD), является азимутом.

Диапазон волн радиолокационных станций. Излучаемый передатчиком радиоимпульс должен содержать не менее нескольких сот полных колебаний. Только в этом случае посланный, а следовательно, и отраженный сигналы будут обладать достаточной энергией. Если длительность импульса составляет, например, 2 мкс и в импульсе содержит-

Глава XIV

ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

Запись и воспроизведение звука широко применяют в радиовещании, кинематографии и других областях техники. В настоящее время распространены механический и магнитный способы записи.

Механический способ записи применяют при изготовлении граммофонных пластинок. На рис. 239 изображена схема станка для механической записи звука. Звуконоситель *1* находится на массивном диске *2*, который равномерно вращается двигателем *4*. Постоянство скорости диска контролируется с помощью стробоскопической шкалы *3*. Двигатель связан с механизмом *5*, перемещающим записывающее уст-

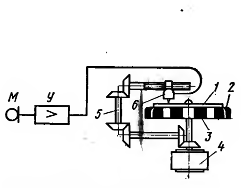


Рис. 239. Схема станка для механической записи звука

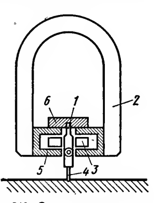


Рис 240. Схема электромагнитного рекордера

ройство *6* в радиальном направлении. Колебания звуковой частоты с микрофона *М* через усилитель *У* подаются на записывающее устройство.

Резец записывающего устройства постепенно продвигается от края к центру диска, вырезая в нем спиральную канавку. Запись ведут на диск из воскообразной смеси. По окончании записи на поверхность диска наносят слой золота или серебра, на который гальваническим способом наращивают слой меди. После удаления воска этот слой станет негативной копией записи, с которой прессуют граммофонные пластинки. В качестве материала для пластинок используют шеллак или полихлорвинил с наполнителями, придающими пластинке необходимую прочность. Изготовляют также пластинки из винилита; они обладают малым уровнем шума.

Записывающее устройство (рекордер) представляет собой электромеханический преобразователь (рис. 240). Между полюсными наконечниками подковообразного магнита *2* расположен якорь *1*. С нижней частью якоря связан держатель с резцом *4*. Якорь может вращаться вокруг оси.

Для упругого закрепления якоря служит пружина, связанная с держателем. Верхний конец якоря входит в демпфер *6*. Во внутренней полости П-образных полюсных наконечников *5* расположена катушка *3*, окружающая якорь, по которой проходит ток звуковой частоты. Этот ток образует вокруг катушки переменное магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и вызывает механические колебания якоря с резцом.

Острие резца рекордера может совершать колебания или поперек направления движения звуконосителя в точке резания, или в глубину звукоснимателя. В соответствии с этим различают два вида записи — поперечную и глубинную.

Воспроизведение механической записи осуществляется звукоснимателем. Наиболее распространенными в настоящее время являются электромагнитные и пьезоэлектрические звукосниматели. Устройство электромагнитного звукоснимателя аналогично устройству электромагнитного рекордера. Принцип действия звукоснимателя показан на

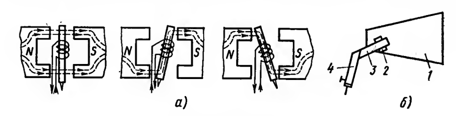


Рис 241. Звукосниматели:
а — принцип действия электромагнитного звукоснимателя, *б* — устройство пьезоэлектрического звукоснимателя

рис. 241, *а*. Когда якорь находится в среднем положении между полюсными наконечниками, магнитный поток вдоль якоря, т. е. внутри катушки, отсутствует. При отклонении якоря вправо и влево воздушные зазоры между якорем и полюсными наконечниками изменяются — один увеличивается, другой уменьшается. Вследствие этого часть магнитного потока проходит вдоль якоря в том или в другом направлении.

Переменный магнитный поток индуктирует переменную э. д. с. На концах катушки появляется переменное напряжение, форма которого соответствует форме записанных на граммофонной пластинке звуковых колебаний. Недостатком электромагнитного звукоснимателя является его большая масса, что приводит к быстрому износу граммофонных пластинок.

Устройство пьезоэлектрического звукоснимателя показано на рис. 241, *б*. Пьезоэлектрический элемент *1* из сегнетовой соли при помощи упругих прокладок *2* зажат одним концом в вилке *3*. На конце вилки имеется трубка *4*, в которой крепится игла. Действие звукоснимателя основано на использовании прямого пьезоэффекта, сущность которого заключается в том, что при механической деформации пластины на ее обкладках появляются электрические заряды противоположного знака. При скольжении иглы по извилинам канавки граммофонной пластинки края вилки нажимают на край пьезоэлемента и

вызывают его нзгнб. В результате этого на обкладках элемеита появляются заряды протнвоположных знаков. Разность потенцналов между обкладками пьезоэлемента соответствует форме запнсн звуковых колебаний.

Магнитный способ записи основан иа свойстве ферромагнитных материалов намагиччваться при воздействни иа ннх магнитного поля н сохранять остаточое намагиичиваиие по выходе из этого поля. В ка-

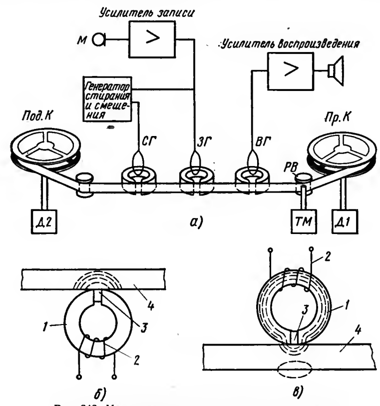


Рис. 242. Магиитная запись и воспроизведение звука:
а — схема аппарата, б — магнитная записывающая головка, в — магнитная воспроизводящая головка

честве звуконосителя чаще всего используют двухслойную магннтную ленту, нмеющую прочиую эластичную немагннтную основу толщиной 50 мкм из ацетилцеллюлозы и магннтный слой толщнной 8—15 мкм. Этот слой состонт из ферромагинтных частнц окнси железа диаметром 0,1 мкм, распределенных в иемагннтной связующей среде.

Устройство, иаиосящее магнитную запись иа звукоиоситель, называется *магнитной записывающей головкой*; устройство, предназначеиое для воспронзведення звука с магнитиой фоиограммы, — *магнитной головкой воспроизведения*.

На рис. 242, *а* показана схема аппарата для магнитной записи и воспроизведения звука (магнитофона). Записываемые звуковые колебания микрофоном *М* преобразуются в электрические колебания той же формы. Мощность электрических колебаний повышается с помощью усилителя записи. Усиленные колебания поступают в обмотку магнитной записывающей головки (рис. 242, *б*). Сердечник *1* из ферромагнитного материала имеет обмотку *2*, подключенную к выходу усилителя записи. По обмотке проходит ток записи, соответствующий записываемому звуку. Ток записи возбуждает в сердечнике переменный магнитный поток.

В одном месте в сердечник вставлена тонкая (10—20 мкм) пластина *3* из немагнитного материала (бронзы или слюды). Это рабочий зазор головки, который создает некоторое препятствие для магнитного потока. Вследствие этого часть потока в этом месте выходит наружу из сердечника, образуя магнитное поле записи, которое действует на движущуюся магнитную ленту, прилегающую к сердечнику. В результате этого лента намагничивается по длине в такт с записываемыми звуковыми колебаниями. На ленте образуется невидимая дорожка магнитной записи, и она превращается в так называемую магнитную фонограмму.

В процессе записи магнитная лента перематывается с подающей кассеты *Под. К* на приемную кассету *Пр. К* (рис. 242, *а*). Для продвижения ленты в прямом и обратном направлениях, а также для ускорения перемотки служат электродвигатели. Двигатель *Д1* приемной кассеты при движении ленты в прямом направлении (слева направо) сматывает ее в рулон. Тонмотор *ТМ* обеспечивает постоянную скорость движения ленты около магнитных головок. Валик *РВ* плотно прижимает магнитную ленту к вращающейся ленте тонмотора.

Двигатель *Д2* подающей кассеты служит для обеспечения требуемого натяжения ленты. С этой целью его обмотка включается на пониженное напряжение, причем вал двигателя стремится вращаться в сторону, противоположную направлению движения ленты.

Перед новой записью удаляют с магнитной ленты ненужную запись, т. е. стирают ее. Для этой цели служит стирающая головка *СГ*. Для стирания записи через обмотку пропускают ток высокой частоты от специального генератора. Одновременно с генератора подается ток на обмотку записывающей головки *ЗГ*. Этот ток (ток смещения) улучшает качество записи.

Для воспроизведения записи используется магнитная воспроизводящая головка *ВГ*, которая устроена так же, как и записывающая. При воспроизведении фонограмма *4* (рис. 242, *в*), движущаяся с такой же скоростью, с какой двигалась магнитная лента при записи, соприкасается с сердечником *1* воспроизводящей головки. Так как магнитное сопротивление сердечника очень мало, то в него переходит бóльшая часть внешнего магнитного потока фонограммы. Поскольку величина внешнего магнитного потока изменяется по длине фонограммы в соответствии с записанным звуком, то аналогично изменяется по времени и поток в сердечнике. Но изменение магнитного потока в сердечнике вызывает появление э. д. с. в его обмотке *2*. Образующийся электри-

ческий сигнал затем усиливается усилителем воспроизведения и при помощи громкоговорителя преобразуется в звук.

Благодаря высоким качественным, эксплуатационным и экономическим показателям магнитная запись широко используется для записи как черно-белых, так и цветных телевизионных программ, а также в качестве запоминающего устройства в импульсной технике, в аппаратуре для трансформации спектра и др.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия электромагнитного звукоснимателя?
2. Как устроен пьезоэлектрический звукосниматель?
3. По схеме, показанной на рис. 242,*а*, рассказать, как осуществляются магнитная запись и воспроизведение звуковых программ.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев Ф. Ф. Электронные устройства автоматики и их расчет М., «Машиностроение», 1971.

Анисимов Б. В., Савельев А. Я. Основы конструирования и производства ЭВМ. М., «Высшая школа», 1972.

Батушев В. А. Электронные приборы. М., «Высшая школа», 1969.

Белоцерковский Г. Б. Основы импульсной техники и радиолокации. М., «Судостроение», 1965.

Бетин Б. М. Радиопередающие устройства. М., «Высшая школа», 1972.

Бодиловский В. Г. Электровакуумные приборы в устройствах автоматики, телемеханики и связи. М., «Транспорт», 1972.

Гинзбург С. А., Лестман И. Я., Малов В. С. Основы автоматики и телемеханики. М., «Энергия», 1968.

Гуткин Л. С. Лебедев В. Л., Сифоров В. И. Радиоприемные устройства (часть I), М., «Советское радио», 1961.

Гуткин Л. С., Лебедев В. Л., Сифоров В. И. Радиоприемные устройства (часть II), М., «Советское радио», 1963.

Дулин В. Н. Электронные приборы, М., «Энергия», 1969.

Доброневский О. В. Справочник по радиоэлектронике. Киев, «Высшая школа», 1971.

Дроздов Е. А., Комарницкий В. А., Пятибратов А. П. Электронные цифровые вычислительные машины. М., Воениздат, 1968.

Зимин В. А. Электронные вычислительные машины. М., «Машиностроение», 1971.

Изюмов Н. М. Основы радиотехники. М., «Связь», 1965.

Казник М. Л., Макеев Г. М., Сафрошин Н. А. Основы телевидения. М., «Высшая школа», 1973.

Калашников А. М., Слуцкий В. З. Электровакуумные приборы и импульсная техника. М., Воениздат, 1965.

Колосов С. П., Калмыков И. В., Нефедов В. И. Основы автоматики. М., «Машиностроение», 1970.

Линде Д. П. Радиопередающие устройства. М., «Энергия», 1969.

Михайлов А. В., Новосельская Н. Ф., Ткачев В. П. Электронные вычислительные машины. М., «Статистика», 1971.

Палшков В. В. Радиоприемные устройства. М, «Связь», 1965.

Радиолокационные устройства. Под редакцией Григорина-Рябова В. В. М., «Советское радио», 1970.

Самойлов В. Ф., Маковеев В. Г. Импульсная техника. М., «Связь» 1972.

Цыкина А. В. Усилители. М., «Связь», 1972.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Преднсловне 3
Глава I. Введение 4
§ 1. Раднотехннка н электроника 4
§ 2. Прннцнпы раднопередачн н раднопрнема . . . 8
Глава II. Электронные, нонные н полупроводннковые прнборы 11
§ 3. Фнзнческне основы электроннкн . . . 11
§ 4. Краткне сведення о катодах (эмнттерах) 14
§ 5. Устройство электронных ламп . . . 16
§ 6. Двухэлектродные лампы (дноды) . . . 17
§ 7. Трехэлектродные лампы (трноды) . . . 20
§ 8. Четырехэлектродные лампы (тетроды) . . 25
§ 9. Лучевые тетроды н пентоды 27
§ 10. Комбннированные н многосеточные лампы . . . 30
§ 11. Генераторные лампы 30
§ 12. Электронные лампы для сверхвысокнх частот . . 32
§ 13. Электроннолучевые трубкн 36
§ 14. Ионные прнборы 39
§ 15. Полупроводнековые дноды 44
§ 16. Полупроводннковые трноды 52
§ 17. Фотоэлектронные прнборы 60
Глава III. Выпрямнтелн 66
§ 18. Схемы выпрямнтелей 66
§ 19. Сглажнвающне фнльтры 68
§ 20. Стабнлнзацня напряження н тока . . . 70
Глава IV. Усилнтелн ннзкой частоты 73
§ 21. Показатели работы усилнтеля 73
§ 22. Схемы цепей пнтання усилнтелей 77
§ 23. Усилнтелн напряження 82
§ 24. Усилнтелн мощности 88
§ 25. Обратные связи в усилителях 96
Глава V. Колебательные снстемы 103
§ 26. Свободные колебання в контуре 103
§ 27. Вынужденные колебання в последовательном контуре 106
§ 28. Вынужденные колебания в параллельном контуре 112
§ 29. Связанные колебательные контуры 116
§ 30. Колебательные снстемы с распределенными постоянными 121
Глава VI. Распространение радиоволн н антенно-фндерные устройства 129
§ 31. Влияние атмосферы на распространение радноволн 129
§ 32. Общие свойства радиоволн. Распространение радноволн различных днапазонов 130
§ 33. Излучение радиоволн 135
§ 34. Антенны длинных, средних и коротких волн . . 140
§ 35. Фидерные устройства н волноводы . . . 146
Глава VII. Специальные н резонансные усилители 150
§ 36. Широкополосные усилители (вндеоусилнтели) . . 150
§ 37. Схемы коррекции частотной характеристики на нижних н верхних частотах днапазона 151
§ 38. Усилители постоянного тока 153
§ 39. Фазочувствительные усилители 156
§ 40. Резонансные усилители 159
Глава VIII. Генераторы 162
§ 41. Генераторы синусоидального напряжения . . . 162
§ 42. Генераторы пилообразного напряжения 167
§ 43. Генераторы прямоугольного напряжения 172

3-57 - отдел кадров.
3-44 - набор

Глава IX. **Электронные и фотоэлектронные реле** 192
§ 44. Электронные реле 192
§ 45. Фотоэлектронные реле 205
Глава X. **Радиопередающие устройства** 209
§ 46. Качественные показатели радиопередатчиков . . 209
§ 47. Задающий генератор 210
§ 48. Усилитель мощности 214
§ 49. Стабилизация частоты в радиопередатчиках . . . 216
§ 50. Управление колебаниями высокой частоты 218
§ 51. Передатчики сверхвысоких частот 230
Глава XI. **Радиоприемные устройства** 241
§ 52. Назначение и качественные показатели радиоприемников 241
§ 53. Блок-схема радиоприемника 242
§ 54. Входные цепи и усилители высокой частоты . . 245
§ 55. Преобразователи частоты и усилители промежуточной частоты 247
§ 56. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов 250
§ 57. Прием частотно-модулированных сигналов . . . 251
§ 58. Регулировки в приемниках 254
§ 59. Приеминки диапазонов УКВ 260
§ 60. Помехи радиоприему и современные способы усиления сигналов 261
Глава XII. **Основы вычислительной техники** 266
§ 61. Общие сведения 266
§ 62. Системы счисления 269
§ 63. Логические элементы 275
§ 64. Запоминающие устройства 285
§ 65. Арифметические устройства 287
§ 66. Устройства управления 290
§ 67. Устройства ввода и вывода 291
Глава XIII. **Радиолокация** 293
§ 68. Физические основы радиолокации 293
§ 69. Качественные показатели радиолокационных станций 297
§ 70. Передатчики радиолокационных станций 302
§ 71. Приемники радиолокационных станций 304
§ 72. Индикаторные устройства 308
§ 73. Синхронизирующие устройства и синхронно-следящие системы 309
Глава XIV. **Запись и воспроизведение звука** 313
Литература 317

Пруслин Залман Менделевич
Смирнова Маргарита Александровна

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Научный редактор Ракоасий Альберт Рафаэльеаич. Редактор Кобрисиая М. В. Художественый редактор Паиина Т. В. Художиик Федичкии Ю. Д. Техничесий редактор Нестерова А. К. Корректор Чечеткина Г. А.

Т-02577 Сдано а иабор 12/XI-74 г. Подп. и печати 3/IV-75 г. Формат $60\times90^{1}/_{16}$ Бум. тип. № 3. Объем 20 печ. л. Усл. п. л. 20, Уч.-изд. л. 20,47. Изд. № ЭГ—227 Тираж 100 000 акз. Цена 57 коп. Заи. 762. Плаи выпуска литературы для профтехобразоваиия издательства «Высшая школа» на 1975 г. Позиция 60. Москва, К-51, Неглииная ул., д. 29/14. Издательство «Высшая школа»

Ярослаасиий полиграфкомбииат «Союзполиграфпрома» при Государствеиом комитете Совета Министроа СССР по делам издательств, полиграфии и киижной торговли. 150014, Ярославль, ул. Саободы, 97.

57 коп.